



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JONI PIRHONEN  
SISÄILMAN OLOSUHDEMITTAUKSET UUSISSA JA KORJA-  
TUISSA PALVELURAKENNUKSISSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
taneuvoston kokouksessa 9. marras-  
kuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**JONI PIRHONEN:** Sisäilman olosuhdemittaukset uusissa ja korjatuissa palvelurakennuksissa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 78 sivua, 18 liitesivua

Huhtikuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: paine-ero, lämpö- ja kosteustekninen toiminta, konvektio, sisäilma, energiatehokkuus, energiankulutus, koneellinen ilmanvaihto, paine-erolähetin, anturi

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmässä osana kansallista COMBI-hanketta. Työssä tutkitaan erityisesti julkisten uudis- ja saneerattujen palvelurakennusten sisä- ja ulkoilman välisiä paine-eroja. Työssä pyrittiin tuottamaan tietoa myös laajemmin tutkimuksiin valituista case-kohteista ja niistä tehtävistä muista sisäilman olosuhdemittauksista. Tämän diplomityön painopiste oli painesuhteiden mittauksissa ja laiteasennuksissa Helsingin uudiskohteissa sekä korjatuissa case-kohteissa.

Rakennusten paine-erojen mittaaminen on suoritettu rakennusfysiikan tutkimusryhmässä rakennettujen, etäluettavien paine-eromittareiden avulla. Yksittäinen mittaussyksikkö sisältää paine-erolähtetimen, mikrotietokoneen, GSM-modeemin sekä virtalähteen. Paine-erolähtetimiä vertailemalla saatiin valittua teknis-taloudellisesti soveltuvin mittaussyksikkö, joita sijoitettiin rakennuksen korkeudesta ja ilmanvaihdon toteutuksesta riippuen 2-4 kpl per kohde. Mitattavia kohteita hankkeessa oli yhteensä 24 kappaletta Pirkanmaan ja Helsingin alueilla. Jako uudis- ja korjauskohteiden välillä oli 12/12 kappaletta.

Pitkän aikavälin paine-eromittausten valmistelu ja asennustyö on erittäin haastavaa. Oikeanlaisten komponenttien löytäminen ja yhteensovittaminen sekä mittaustyöhön nähdessä käyttökuntoon saattaminen vaatii paitsi paljon aikaa, myös asiansa osaavaa henkilökuntaa.

Kohteiden paine-eromittausten tulosten ajanjakso oli 1.10.16 – 30.11.16. Tulosten mukaan kohteiden suurimmat alipaine-erot vaihtelivat välillä -150,37 Pa...-33,84 Pa ja yli-paine-erot välillä 121,36 Pa...33,56 Pa. Yhden prosentin persentiili vaihteli välillä -40,85 Pa...-8,28 Pa ja 99 % persentiili välillä 16,00 Pa...0,08 Pa. Paine-eroarvojen keskiarvot vaihtelivat välillä 0,48 Pa...-20,45 Pa.

Useissa rakennuksissa muodostui erittäin suuria, hetkellisiä paine-eropiikkejä. Näiden piikkien vaikutusta sisäilman laatuun tulisi minimoida laitteiden riittävällä huollolla ja säädöillä. Persentiiliarvojen ja keskiarvojen perusteella noin puolessa Helsingin kohteista muodostui myös liian suuria alipaineita pitkällä aikavälillä. Ylipaineiden osalta samaa ilmiötä ei havaittu.

## ABSTRACT

**JONI PIRHONEN:** Indoor air condition measurements in new and renovated municipal service buildings.

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 78 pages, 18 Appendix pages

April 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Design

Examiner: Professor Juha Vinha

**Keywords:** differential pressure, hygrothermal behavior, convection, air inside (inside air), energy efficiency, energy consumption, forced ventilation

This thesis is part of a national Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings- project run by the Building Physics research group in Tampere University of Technology (TUT). The main focus for this thesis is to undertake measurements for the differential pressures between inside and outside air in new and renovated municipal service buildings. Another important goal was to provide wide spectrum of information from all selected subject buildings in all other inside air condition measurement methods for further use. Focus for this thesis is in differential pressure measurements and equipment installations for new and renovated subject buildings in Helsinki area.

Differential pressure measurements in subject buildings were executed using remotely readable measuring devices that were manufactured in Building Physics research group. A single measuring unit includes: differential pressure transmitter, micro-computer, GSM-modem and a power supply. The most technical- and cost-effective solution could be made by comparing the transmitters that would be installed 2-4 pieces per building considering the height and ventilation of the building. Subject buildings that would take part in the inside air conditions measuring were included 24 pieces altogether from Pirkanmaa and Helsinki areas. Distribution between new and renovated buildings was 12 and 12.

Preparing for long-term differential pressure measuring and equipment installations proved to be challenging. Discovering and coordinating proper components for measuring work is time consuming and requires very proficient working staff.

Time-span for the differential pressure measurements in subject buildings was from 1.10.16 to 30.11.16. According to the results, values for negative pressure (underpressure) varied between -150,37 pascals and -33,84 pascals and for positive pressure (excess pressure) the variation was between 121,36 pascals and 33,56 pascals. One percent percentile varied between -40,85 pascals and -8,28 pascals whereas the results for 99 percent percentile varied between 16,0 pascals and 0,08 pascals. Mean for the differential pressure values varied between 0,48 Pa and -20,45 Pa.

Many of the subject buildings had extremely high, brief differential pressure value spikes. The effect of these differential pressure spikes should be minimized with proper ventilation equipment maintenance and adjustment. According to percentile and mean values approximately half of the subject buildings in Helsinki had too high negative differential pressure values in long time-frame. Same phenomenon for the excess pressures was not detected.



## ALKUSANAT

Diplomityöni on omistettu tyttärilleni Emmalle ja Venlalle, joille tekemääni lupausta edelleen lunastan.

Kiitokset Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitokselle, jonka COMBI-hankeen osana sain eturivin paikan päästä näkemään ja ratkaisemaan niitä haasteita ja ongelmia, joita tulevaisuuden Suomi kohtaa rakentamisen saralla.

Mihkel Kivisteä kiitän mittalaitteiden kokoonpanojen ja kenttäasennusten ohjaamisesta sekä mitattavien kohteiden kartoittamisesta. Samu Häyrysellä kiitokset paine-eromittareiden valmistamisesta ja kalibroinnista. Anssi Laukkariselle kiitos mainioista neuvoista ja ohjeista läpi koko diplomityöni.

Professori Juha Vinhaa kiitän diplomityöni ohjaamisesta sekä tarkastamisesta.

Tampereella, 25.4.2017

Joni Pirhonen

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen taustaa.....	1
1.1.1	FinZEB-hanke .....	2
1.1.2	COMBI-hanke (Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings) .....	4
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö.....	5
1.3	Tutkimuksen rajaukset .....	6
2.	TEOREETTINEN TAUSTA .....	7
2.1	Yleistä.....	7
2.1.1	Paine ja paine-ero.....	7
2.1.2	Lämpö .....	12
2.1.3	Suhteellinen kosteus.....	16
2.1.4	Hiilidioksidi .....	18
2.1.5	Radon .....	21
2.2	Lämmön ja kosteuden siirtyminen .....	21
2.3	Energian ja aineen säilyminen.....	25
3.	RAKENNUSFYSIKAALISET MITTAUKSET .....	28
3.1	Paine-eron mittaaminen.....	28
3.2	Lämpötilan mittaaminen .....	29
3.3	Hiilidioksidin mittaaminen.....	32
3.4	Suhteellisen kosteuden mittaaminen .....	33
3.5	Radonin mittaaminen .....	34
4.	PAINE-EROJEN MITTAAMINEN CASE-KOhteissa .....	35
4.1	Yleistä.....	35
4.2	Paine-erolähettimien ja varusteiden valinta .....	35
4.2.1	Raspberry Pi.....	36
4.2.2	Vaatimukset antureille ja varusteille.....	37
4.2.3	Antureiden vertailu .....	38
4.2.4	Antureiden kalibrointi, viritys ja antureiden valinta .....	39
4.2.5	Mittausyksikkö.....	43
4.3	Mittaustulos ja sen luotettavuus .....	44
4.3.1	Mittalaitteen resoluutio .....	45
4.3.2	Hystereesi.....	46
4.4	Mittausyksiköiden sijoittaminen kohteissa .....	46
4.5	Tiedonsiirto ja tallennus .....	47
5.	TUTKITTAVAT KENTTÄMITTAUSKOhteET .....	48
5.1	Yleistä.....	48
5.2	Kohteiden valintakriteerit.....	48
5.2.1	Valitut kohteet.....	49
5.3	Mittauksien laajuudet kohteissa .....	53

5.4	Mittausyksiköiden asennustyö kohteissa .....	53
5.4.1	Paine-eromittareiden asennus .....	54
5.4.2	Lämpötila-, hiilidioksidi- ja RH- mittareiden asennukset kohteissa 60	
6.	TULOKSET .....	62
6.1	Kenttämittausten tulokset .....	62
7.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	73
	LÄHTEET .....	76

LIITE 1: ANTUREIDEN (VAISALA, BECK) VERTAILUMITTAUKSET

LIITE 2: KALIBROINTIEN TULOKSET

LIITE 3: TUTKITTAVIEN KOHTEIDEN POHJAPIIRUSTUKSET JA MITTALAITTEIDEN SJOITTELU

LIITE 4: COMARK- MITTALAITTEEN TEKNISET TIEDOT

LIITE 5: ROTRONIC CL11- MITTALAITTEEN TEKNISET TIEDOT

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

adheesio	Molekyylien (esimerkiksi vesimolekyylit) vuorovaikutusta ympäristönsä kanssa. Adheesiossa vuorovaikutuksessa olevat molekyylit järjestyvät siten, että toisen aineen molekyylien negatiivinen osa vetää toisen aineen positiivista osaa puoleensa.
alipaine	Tilassa on ympäristöään alhaisempi paine. Ilma (tai muu kaasu) pyrkii virtaamaan tilan ulkopuolelta alipaineiseen tilaan.
diffuusio	Kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiosta kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta alemmaa pitoisuutta kohden.
divergenssi	Matematiikassa vektorilaskentaan liittyvä differentiaalioperaattori, joka kuvaa vektorikentän lähteisyyttä. Divergenssi on skalaari, jonka voidaan katsoa kuvaavan pisteestä lähtevän tai siihen päättyvän vektorivuon tiheyttä.
ilmanpaine	Normaali ilmanpaine merenpinnan tasolla on 101,325 hPa (= 1 atm).
konvektio	Konvektio syntyy, kun kaasu tai neste virtaa ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio, esimerkiksi tuuli tai ilmanvaihtolaitteisto) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta. Lämpö ja vesihöyry siirtyvät konvektiolla virtaavan ilman mukana.
off set	Paine-eroanturin (paine-erolähtetin) tehdasasetus ja/tai tilaajan määrittäminen, jossa anturin ilmoittama mittaustulos poikkeaa tietyn vakiolukeman verran oletetusta nollatasosta.
paine	Fysikaalinen suure, mikä kuvaa pinta-alayksikköön kohdistuvaa kohtisuoraa voimaa $P = F/A$ . Paineen yksikkö SI-järjestelmässä on pascal [Pa]. $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ .
pasute	Rikkihappotuotannon sivutuote. Sitä voidaan käyttää raudan korvikkeena terästeollisuuden raaka-aineena.
rakennuksen vaippa	Rakennuksen sisätilat kylmästä ulkoilmasta erottavat rakennusosat.

suhteellinen kosteus	Ilmaisee ilman sisältämän vesihöyryn osapaineen suhdetta vallitsevan lämpötilan määräämän vesihöyryn kylläiseen osapaineeseen. Suhteellista kosteutta kuvataan lyhenteellä RH (Relative Humidity).
ylipaine	Tilassa on ympäristöään suurempi paine. Ilma (tai muu kaasu) pyrkii virtaamaan tilasta tilan ulkopuolelle.

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\lambda$	Materiaalin lämmönjohtavuus kuvaa lämmön siirtymisen helppoutta materiaalin läpi, [W/(mK)]
$\lambda$	Säteilyn eli sähkömagneettisten aaltojen aallonpituutta kuvaava suure, $\lambda = c/v$ [ $\mu\text{m}$ ]
$\delta_{v.mat}$	Vesihöyrynläpäisevyys, kuvaa kuinka helposti vesihöyry siirtyy materiaalin läpi [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] tai [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{sPa})$ ]
$v$	Taajuus, jota käytetään mm. sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksien laskennassa [ $1/\text{s}$ ]
$c$	Valonnopeus väliaineessa, jota käytetään mm. sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksien laskennassa [ $\text{m/s}$ ]
IV	Ilmanvaihto
Pa	Paineen SI-järjestelmän mukainen yksikkö pascal. Yksi pascal on yhden newtonin suuruisen tasaisesti jakautuneen voiman aiheuttama paine yhden neliömetrin alalle ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ )
ppm	”Parts per million”. Kuvaa tietyn aineen hiukkasten määrää tilavuudessa $1 \text{ m}^3$ tilavuuden ollessa jaettu miljoonaan osaan ( $1 \% = 10\,000 \text{ ppm}$ )
$q$	Lämpövirtaa [ $\text{W/m}^2$ ] kuvaava vektorisuure
$Q$	Kappaleeseen siirtynyt tai kappaleen luovuttama lämpömäärä [ $\text{J}$ ]
RH	Suhteellinen kosteus (Relative Humidity)

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen taustaa

Suomessa tavoitellaan vuoden 2018 alusta eteenpäin käyttöönotettavien palvelurakennusten rakentamista lähes nollaenergiarakennuksiksi (nearly zero-energy building, nZEB). Haasteita rakennuksien energiatehokkuuden parantamiseen tuo mm. rakennus- ja taloteknisten järjestelmien suunnittelun ja rakentamisen kustannustehokas toteutus. Rakennusten energiatehokkuutta säätelevät erilaiset EU-direktiivit ja standardit. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) edellyttää, että kaikkien julkisten rakennusten on oltava 31.12.2018 jälkeen lähes nollaenergiarakennuksia. Vuoden 2020 päättyessä määräys kattaa julkisten rakennusten lisäksi kaikki loputkin uudet rakennukset. Suomen on tarkoitus ottaa nämä määräykset käyttöön kaikille rakennuksille jo vuoden 2018 alusta. Suomen kansallisiin suunnitelmiin tulee sisällyttää yksityiskohtaiset kuvaukset lähes nollaenergiarakennusten määritelmien käytännön sovelluksista ottaen huomioon paikalliset olosuhteet ja normit. Suomessa on käytössä rakennusten kokonaisenergiakulutusta kuvaava E-luku. Energiatehokkuutta kuvaavat E-luku-tasot ovat yksi lähtökohta lähes nollaenergiarakentamisen kansallisessa määrittämisessä.

EPBD:n lisäksi lähes nollaenergiarakentamista ohjaavia määräyksiä asettaa uusiutuvan energian käytön edistämisdirektiivi RES (Renewable Energy Sources Directive, voimaan 31.12.2014), jonka mukaan jäsenvaltioiden on omissa kansallisissa rakennusmääräyksissään ja –sääöksissään tai muulla vastaavalla tavalla vastaavin vaikutuksin edellytettävä uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian vähimmäistason täyttävää käyttöä uusissa ja perusteellisesti korjattavissa rakennuksissa (Rakennusteollisuus (2015)).

Energiatehokkuusdirektiivi EED (Energy Efficiency Directive) edellyttää yleisesti esimerkiksi pitkän aikavälin strategiaa rakennusten energiatehokkuuden parantamiseen koskien erityisesti rakennusten peruskorjausta (Rakennusteollisuus (2015)).

Edellä mainitut direktiivit tuodaan Suomen rakentamista ohjaaviin määräyksiin siis kansallisilla asetuksilla. Tällä hetkellä voimassa olevasta vuoden 2012 matalaenergiämääräystasosta tullaan menemään yhä tiukempaan suuntaan, mikä asettaa erityisiä haasteita esimerkiksi rakennusten rakennusfysikaaliselle toiminnalle. Palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseen liittyvien ongelmien, riskien ja vaikutusten selvittämiseen ja ratkaisemiseen on keskittynyt mm. kansallinen COMBI-hanke.

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivissä lähes nollaenergiarakennuksen määritelmä on toistaiseksi epämääräinen (Rakennusteollisuus (2015)). Lähes nollaenergiarakentamisen määritelmien ja tasojen määrittämisen kysymyksiin Suomessa pyrittiin löytämään vastauksia FinZEB-hankkeessa.

### 1.1.1 FinZEB-hanke

Lähes nollaenergiarakentamisen tulevalle säädösvalmistelulle pyrittiin tuomaan taustatietoa Rakennusteollisuus RT ry:n, Talotekniikkateollisuus ry:n ja Ympäristöministeriön koordinoimalla FinZEB- hankkeella. Hankkeen käynnistämällä pyrittiin määrittelemään kansallisella tasolla Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD) lähes nollaenergiarakentamisen käsitteet, tavoitteet ja suuntaviivat. EPBD:n laaja-alainen tulkinnanvaraisuus antoi aihetta koota kansallisella tasolla mahdollisimman kattava näkemys sen tulkinnoista ja määräyksistä (Reinikainen;Loisa;& Tyni, 2015).

Hankkeessa on painotettu viestinnän avoimuutta ja laajaa osaamista. Teemoitettuja työpajoja hankkeessa on ollut neljä ja näiden lisäksi tulosseminaari Finlandia-talolla, joihin osallistujia on ollut useita satoja eri sektoreilta. Hankkeen toteutetut laskennat ja selvitykset on teetetty alan johtavilla konsulteilla ja asiantuntijoilla. FinZEB- hanke käynnistyi syksyllä 2013 ja päättyi 31. maaliskuuta 2015 (Reinikainen;Loisa;& Tyni, 2015).

FinZEB- hankkeen loppuraportin pohjaksi on toteutettu useita eri teknisiä raportteja ja osaraportteja, jotka ovat osa suurempaa taustaraporttia. Loppuraportin taustaraportti koostuu seuraavista osaraporteista (Reinikainen;Loisa;& Tyni, 2015):

- Kustannuslaskenta – asuinkerrostalo ja toimisto	Optiplan Oy
- Pientalojen kustannuslaskenta ja E-luku	Ins.tsto. Vesitaito Oy
- Kustannuslaskenta – koulut ja päiväkodit	Granlund Oy
- Energiaa säästävät tekniset ratkaisut	Granlund Oy
- Laskentasäännöt	Granlund Oy
- Aurinkosähkötarkastelut	Granlund Oy
- Tulevaisuuden sää ja sisälämpötilatarkastelut	Granlund Oy
- Pilottikohteiden kokemuksia	Granlund Oy
- Energiatuotantoketjut – aineistoselvitys	Granlund Oy
- Valaistuksen laadullisten tekijöiden ja energialaskennan määrittely FinZEB- hankkeelle	TAMK

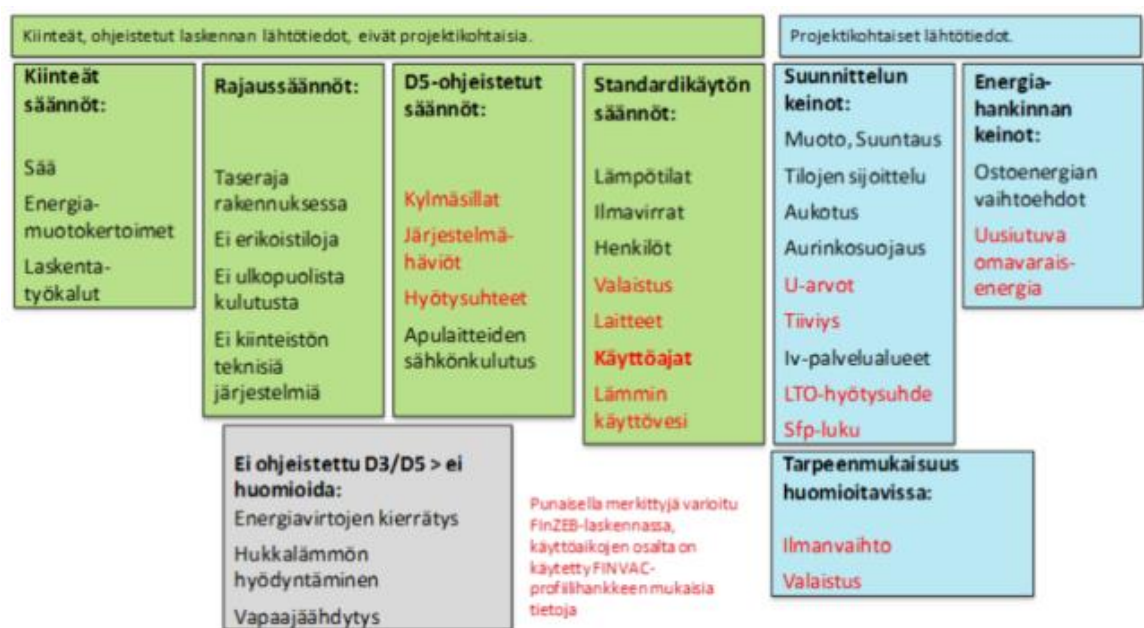
Eri rakennustyypeille ehdotettujen vaatimustasojen ja ratkaisujen taustatyö koostui teknisesti toimivien ja kustannusoptimaalisten ratkaisukokonaisuuksien laskennallisista tarkasteluista. Seuraavassa kuvassa on FinZEB- hankkeessa käytettyjen laskentatarkastelujen metodiikka.





**Kuva 1.1** FinZEB- hankkeen laskentatarkasteluissa käytetty metodiikka (Reinikainen;Loisa; & Tyni, 2015).

Kokonaisenergiatarkastelulle ja E-luvun laskennalle on nykyisissä rakentamismääräyksissä (D3/2012 ja D5/2012) määritelty joukko laskentasääntöjä. Seuraavassa kuvassa on esitetty näitä sääntöjä.



**Kuva 1.2** E-lukulaskennan sääntöjä (Reinikainen;Loisa; & Tyni, 2015).

Laskennan kiinteitä sääntöjä kuvataan vihreissä laatikoissa, jotka mahdollistavat laskentatulosten vertailun tietyn rakennustyyppin kesken. Suunnitteluparametreja, joihin voidaan vaikuttaa suunnitteluratkaisuilla (arkkitehtuuri, rakennesuunnittelu, talotekninen suunnittelu), on esitetty sinisissä laatikoissa. Nämä arvot vaihtelevat kohdekohtaisesti. Sinisten

laatikoiden arvoja muuttamalla voidaan kohteen E-lukuun vaikuttaa merkittävästi. Harmaan laatikon ominaisuuksia nykyisessä E-lukulaskennassa ei ole joko ohjeistettu tai niitä ei ole mahdollista huomioida.

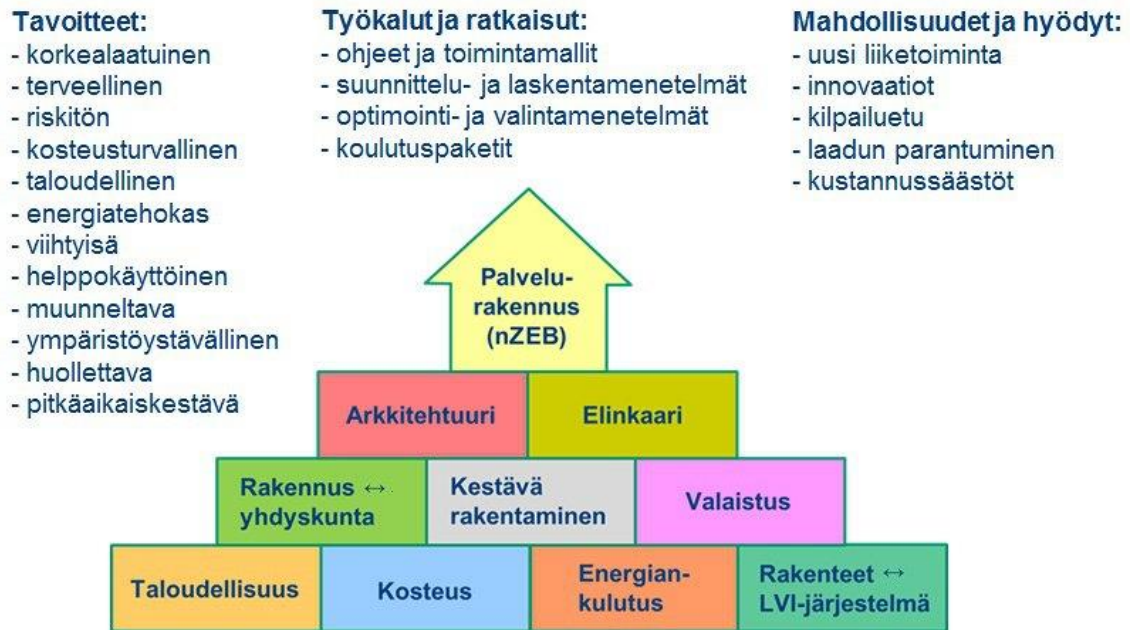
Tämän diplomityön keskeisiä asioita ovat rakennusten ilmanvaihto, rakennuksen ilmatii-  
viys ja ilmanvaihdon toteutus (esim. IV-palvelualueet) kohteissa, joilla on merkittävä osa  
nykyisessä ja tulevassa E-lukuun vaikuttamisessa.

### **1.1.2 COMBI-hanke (Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings)**

Vuoden 2019 alusta lähtien käyttöönotettavien julkisten palvelurakennusten rakentami-  
nen lähes nollaenergiatasoisiksi nykyisestä määräystasosta muodostaa rakennusteknisesti  
monia haasteita. Energiatehokkuuden parantaminen kustannustehokkaasti on erittäin vai-  
kea tehtävä. Yksi energiatehokkuuden parantamisen ”työkaluista” on integroida uusiin  
palvelurakennuksiin enemmän uusiutuvaa energiaa.

Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen vetämässä COMBI- hank-  
keessa keskitytään palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseen liittyvien on-  
gelmien selvittämiseen ja ratkaisemiseen. Tutkimus sisältää viisi eri työpakettia  
(WP1/2/3/4/5), joista neljä keskittyy varsinaisen tutkimustyön tekemiseen ja viides pa-  
ketti tutkimuksen organisointiin ja tulosten tiedottamiseen. Työpaketit käsittävät useita  
tutkimusosioita ja tutkimusryhmiä. Työpakettien koordinoineista vastaavat TTY/Raken-  
nustekniikanlaitos (Rakennusfysiikan tutkimusryhmä), TTY/Arkkitehtuurin laitos  
(Asuntosuunnittelun tutkimusryhmä), Aalto-yliopisto/Energiatekniikan laitos (Energiate-  
hokkuuden ja energiajärjestelmien laboratorio) sekä TTY/Rakennustekniikan laitos (Ra-  
kentamisen prosessien tutkimusryhmä). Tutkimusmetodiikka käsittää laskennallisia tar-  
kasteluja, laboratoriokokeita ja case- kohteissa tehtäviä käytännön mittauksia ja haastat-  
teluja.

Kuvassa 1.3 on esitetty energiatehokkaan palvelurakennuksen tarkastelumalli ja sen osa-  
kokonaisuudet.



**Kuva 1.3** Periaatekuva käytettävästä energiatehokkaiden palvelurakennusten kokonaisvaltaisesta tarkastelumallista (TTY, Rakennustekniikan laitos, 2016).

Tampereen teknillisen yliopiston lisäksi tutkimuksessa on mukana tutkimusryhmiä Aalto-yliopistosta ja Tampereen ammattikorkeakoulusta.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö

Tämän tutkimuksen tavoitteena on ollut kartoittaa COMBI-hankeen työpaketti kolmosen ja osaltaan muiden tutkimusryhmien tarpeisiin soveltuvia case-kohteita Pirkanmaan ja Helsingin alueelta ja suorittaa valituissa kohteissa pitkän aikavälin sisä- ja ulkoilman välisiä paine-erojen mittauksia. Paine-eromittausten toteutuksen osatehtävinä ovat olleet mittalaitteiden komponenttien hankinnat, laitteiden kasaaminen ja käyttökuntoon saattaminen sekä mittalaitteiden kenttäasennukset. Paine-eromittausten lisäksi kohteisiin asennettiin sisä- ja ulkoilman suhteellista kosteutta, lämpötilaa ja sisäilman CO<sub>2</sub>-pitoisuutta mittaavat mittalaitteet. Paine-eromittausten tuloksia tullaan käyttämään taustatietona arvioitaessa muun mittausdatan (esim. radon) mittaamisen laajuutta ja tarpeellisuutta. Tämän lisäksi rakennusten paine-eromittauksilla pyrittiin tuottamaan lisätietoa COMBI-hankkeen osapuolille rakennusten energiankulutuksen ja vaipparakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan kysymyksiin.

Tutkimus käsittää case-kohteiden hankinnat, tutkimuskaluston selvitys- ja asennustyöt sekä tutkimustulosten analyysia ja dokumentointia.

### 1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa keskityttiin tuottamaan case-kohteita tutkimalla reaaliajassa muuttuvaa paine-erodataa tutkimusryhmien jatkokäyttöä ja -tutkimusta varten. Kenttämittausten lopullinen mittausaika on noin kaksi vuotta, minkä johdosta tähän diplomityöhön on kerätty tuloksia vain noin kahden kuukauden ajalta ilman syvempää analyysia. Tässä tutkimuksessa esitetään mahdollisia suuntaviivoja ja ehdotuksia sekä parannusnäkemysä pitkäaikaisen tutkimustyön loppuajalle. Tarkoituksena on siis tukea loppututkimusta mittalaitteiden asennusten, mittausdatan hankinnan ja tulosten alkuanalyysin osilta.

## 2. TEOREETTINEN TAUSTA

### 2.1 Yleistä

Rakennusfysiikka käsittää rakennuksen rakenneosien (seinät, katto, perustukset) fysikaalisen toiminnan ja siihen liittyvien fysikaalisten ilmiöiden tutkimista ja analysointia sekä suunnittelua. Rakennuksen vaipparakenteisiin vaikuttavat fysikaaliset prosessit liittyvät lämpöön, kosteuteen ja ilman liikkeisiin, jotka omalta osaltaan määrittävät rakennuksen toiminnan (Hagentoft, 2012). Tästä johtuen lämmön ja massan (kosteus ja ilma) siirtymät ovat rakennusfysiikan keskeisiä asioita ja erityisiä kiinnostuksen kohteita. Rakennusfysiikallisessa suunnittelussa otetaan huomioon tulevat lämpö- ja kosteusolosuhteet sekä ennustetaan olemassa olevilla laskentatyökaluilla rakennuksen vaipparakenteiden teknistä toimintaa.

Tämä diplomityö käsittelee erityisesti paine-eromittauksia valituissa case-kohteissa. Seuraavat fysikaaliset termit ovat suoraan tai välillisesti rakennuksen sisä- ja ulkoilman väliin paine-eroihin liittyviä ilmiöitä tai ominaisuuksia.

#### 2.1.1 Paine ja paine-ero

Paine on aineen nestemäistä ja kaasumaista olomuotoa koskeva suure, joka määritellään pintaa vastaan kohtisuoraan vaikuttavan voiman  $F$  ja saman pinnan alan  $A$  osamääränä:

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

missä

$p$  on paine, Pa

$F$  on voima, N

$A$  on pinta-ala, m<sup>2</sup>

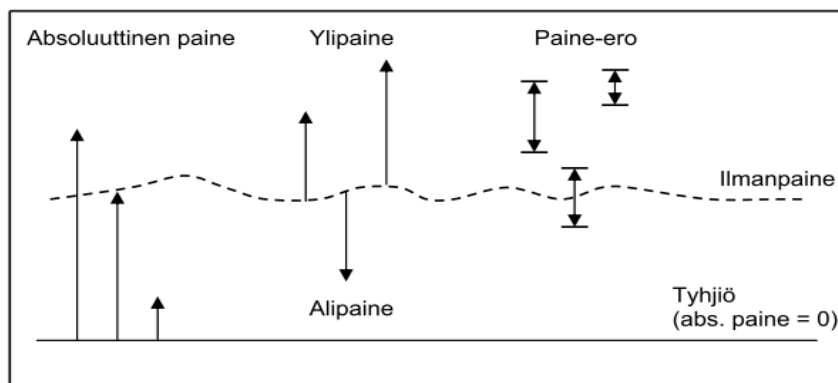
Paine on pieni yksikkö, ja usein käytetäänkin sen kerrannaisia: 1hPa, 1kPa, 1 MPa. Paineen yksikkönä käytetään yleisesti myös SI-järjestelmään kuulumatonta baaria (1 bar = 100000 Pa). Baari on erityisesti ilmatieteessä yleisesti käytetty yksikkö.

Paineen mittaaminen on aina paine-eron mittaamista. Vertailuarvosta riippuen käytetään paineelle erilaisia nimityksiä ja mittalaitteita.

Absoluuttisen paineen vertailuarvo on tyhjiö. Vallitseva ilmanpaine on ilmakehän aiheuttamaa absoluuttista painetta. Ilmanpaine vaihtelee osana säätilan vaihteluita ja siihen vaikuttaa mittauspaikan korkeus merenpinnasta. Vallitsevan ilmanpaineen mittareita sanotaan barometreiksi.

Ylipaineen vertailuarvona on vallitseva ilmanpaine. Ylipaineen muuttaminen absoluuttiseksi paineeksi tapahtuu lisäämällä siihen muunnoshetkellä vallitseva ilmanpaine. Alipaine on vastaavasti negatiivista ylipainetta.

Paineelle käytettäviä, vertailuarvosta riippuvia nimityksiä on esitetty kuvassa 2.1.



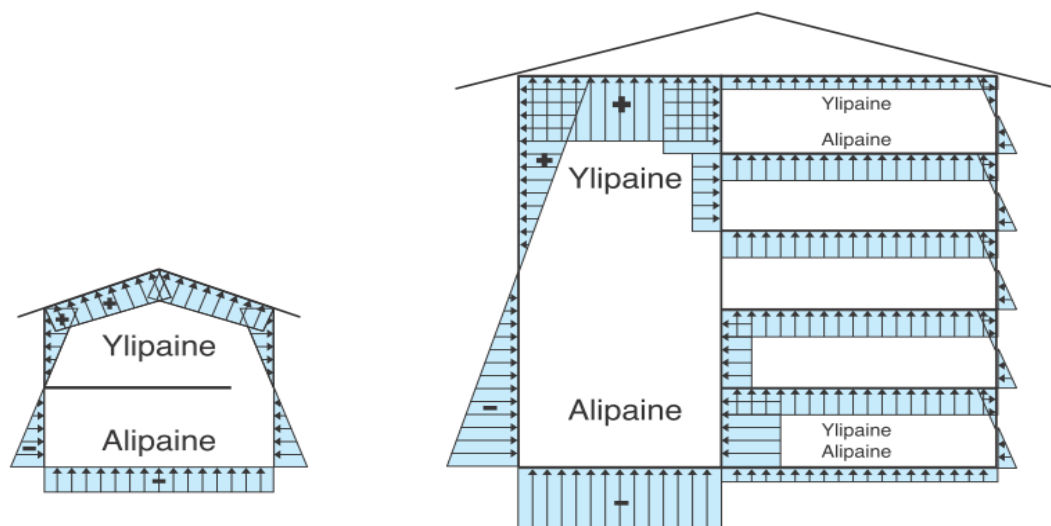
**Kuva 2.1** Paineelle käytettäviä nimityksiä riippuen vertailuarvosta (Saxholm & Rantanen, 2011).

Rakennuksissa paine-eroja aiheuttaa ulko- ja sisälämpötilojen väliset erot, kuten on esitetty kuvassa 2.2. Paine-ero aiheutuu eri lämpötiloissa olevien ilmassojen tiheyserosta. Tätä ilmiötä kutsutaan termiseksi paine-eroksi eli savupiippuvaikutukseksi. Mikäli ulkolämpötila on sisälämpötilaa kylmempi, muodostuu rakennuksen alaosaan alipainetta ja yläosaan ylipainetta.

**Taulukko 2.1** Terminen paine-ero eri ulkolämpötiloilla metriä kohti, kun sisälämpötila on  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Päkkilä, 2012).

Ulkolämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Terminen paine-ero [ $\text{Pa/m}$ ]
20	0,00
10	0,42
0	0,86
-10	1,35
-20	1,87
-30	2,43

Rakennuksen ilmatiiviydellä on painesuhteiden muodostumiseen suuri merkitys. Jos rakennus ajatellaan absoluuttisen tiiviiksi rakenteeksi, rakennuksen painesuhteiden muodostuminen voidaan esittää seuraavan kuvan mukaisesti.



**Kuva 2.2** Sisä- ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta johtuvat rakennuksen paine-erot (Kattoliitto ry, 2013).

Lämpötilaerojen lisäksi painesuhteiden muutoksia rakennuksissa aiheuttaa ilmanvaihtolaitteet ja tuuli. Rakennuksen ilmanvaihto voidaan toteuttaa kolmella eri järjestelmällä: painovoimainen ilmanvaihto, koneellinen poistoilmanvaihto ja koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Rakennuksen ilmanvaihto voi olla toteutettu myös käyttämällä edellä mainittujen järjestelmien jotakin yhdistelmää.

Koneellisesti toteutetun ilmanvaihdon virtausepätasapaino ja siitä johtuvat paine-erot voivat olla seurausta ilmanvaihtojärjestelmän väärästä käytöstä, puutteellisesta huollosta tai säädöstä, pitkästä käyttöiästä (laitteiston fysikaalinen kuluminen) tai korvausilman saannin hallittavuuden puutoksista (epätiivis rakennus). Koneellisen ilmanvaihdon säätöjen merkitystä on selvennetty taulukossa 1.2.

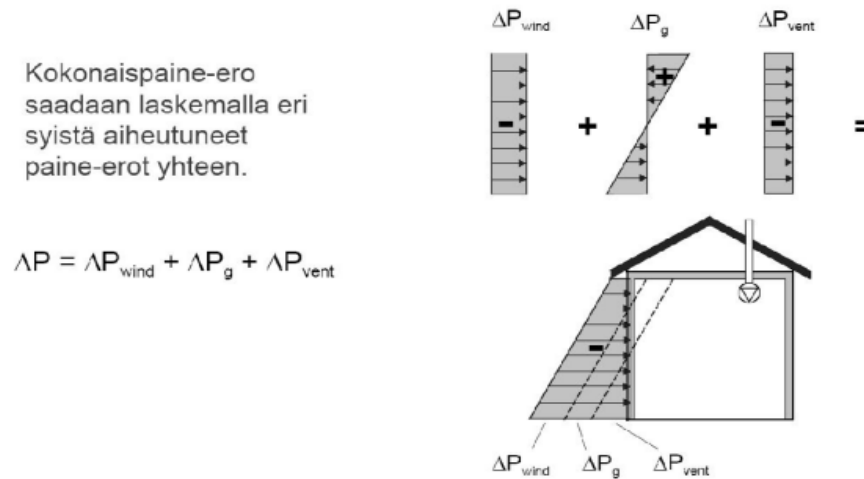
Rakennukset suunnitellaan nykyisin yleensä hieman alipaineisiksi (D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma), jotta vältetään rakenteiden kosteusvaurioilta ja mikrobin ja muiden epäpuhtauksien kulkeutumiselta haitallisessa määrin sisäilmaan.

**Taulukko 1.2** Ilmanvaihdon säätöjen vaikutus paine-eroihin eri tiiviysasteen rakennuksissa, Vinha 2012 (Katainen & Vähämaa, 2015).

Ilmanvaihdon säätö	Paine-ero (Pa) $n_{50} = 0,15 \text{ 1/h}$	Paine-ero (Pa) $n_{50} = 4,0 \text{ 1/h}$	Paine-ero (Pa) $n_{50} = 10,0 \text{ 1/h}$
Tasapainotettu ilmanvaihto	-7...+4	-6...+4	-6...+4
15 % vähemmän tuloilmaa	-33...-22	-7...+4	-6...+4
15 % enemmän tuloilmaa	+15...+26	-6...+5	-5...+4

Tuuli aiheuttaa rakennuksen tuulenpuoleiseen pintaan ylipainetta ja sivuseinille sekä suojanpuolen seinille alipainetta. Tuulikuormat vaihtelevat ajan ja rakennukseen vaikuttavan korkeusresultantin mukaisesti (RIL 201, 2011).

Rakennuksen kokonaispaine-ero syntyy kuvan 2.3 mukaisesti laskemalla eri tekijöiden aiheuttamat paine-erot yhteen.



**Kuva 2.3** Kokonaispaine-eron  $\Delta P$  muodostuminen rakennuksessa, jossa on koneellinen poistoilmanvaihto, Vinha 2009 (Seppänen, 2010).

Paine-eroja syntyy myös tilojen välillä rakennuksen sisällä. Lähtökohtaisesti rakennuksen sisällä vallitsevien painesuhteiden tulisi olla sellaisia, että ilmamassat siirtyvät puhtaiden ja likaisten tilojen välillä puhtaasta likaiseen. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että koneellisesti ilmaa vaihdettaessa rakennuksissa pudas, raitis ilma tuodaan oleskelutiloihin erillisiä tuloilmaventtiileitä ja -kanavia myöten ja poistetaan tiloista, joissa muodostuu sisäilman epäpuhtauksia (hajuja ja/tai kosteutta) kuten keittiöistä ja wc-tiloista.

**Taulukko 2.3** Tavoitteelliset paine-erot eri ilmanvaihtojärjestelmissä, Sosiaali- ja terveysministeriö 2009 (Katainen & Vähämaa, 2015).

Ilmanvaihtotapa	Paine-ero	Huomautuksia
Painovoimainen ilmanvaihto	0...-5 Pa ulkoilmaan ±0 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat voimakkaasti sään mukaan
Koneellinen poistoilmanvaihto	-5...-20 Pa ulkoilmaan 0...-5 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat voimakkaasti sään mukaan
Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto	0...-2 Pa ulkoilmaan ±0 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat voimakkaasti sään mukaan

Helsingin ja Vantaan kouluihin ja päiväkoteihin liittyvässä tutkimuksessa pyrittiin selvittämään 13:ta vuosina 2005 – 2011 valmistuneen koulu- ja päiväkotirakennuksen sisäilmaongelmien syitä ja seurauksia jatkotutkimuksia varten. Tutkimuksessa selvitettiin



muun muassa ilmanvaihdon toimivuuden osuutta sisäilmaongelmiin. Tutkimuksen alustavissa tuloksissa todetaan, että yleisin sisäilmaongelmiin liittyvä syy on ilmanvaihtojärjestelmien puutteellinen toiminta. Ilmanvaihtojärjestelmien puutteellista toimintaa havaittiin jopa 85 %:ssa ongelmakohteista (Vornanen-Winqvist et al., 2015).

Itä-Suomen yliopistossa tehdyssä rakennusterveysasiantuntijakoulutuksen opinnäytetyössä (Katainen & Vähämaa, 2015) todetaan, että koneellisen ilmanvaihdon säädöillä ei voida täysin hallita ilmapuotojen suuntaa rakenteiden epätiiviysskohdissa johtuen painesuhteiden vaihteluista tuulen ja lämpötilaerojen vaikutuksesta. Opinnäytteessä tehtiin pitkäkestoisia paine-eromittauksia kahdessa kohteessa. Tutkimuksen mukaan rakennukset eivät ole yksinomaan ali- tai ylipaineisia, vaan tulisi puhua ”vallitsevasta painesuhteesta”, jolla tarkoitetaan ilmanvaihtolaitteiston, savupiippuvaikutuksen ja muuttuvien tuuliolosuhteiden yhteisvaikutusta rakennuksen paine-eroihin. Lisäksi yhtenä tutkimuksen keskeisenä päätelmänä voidaan pitää pitkäkestoisen paine-eromittauksen tärkeyttä rakennuksen todellisten painesuhteiden kartoittamisessa. Opinnäytteen tuloksissa on todettu rakennusten alaosat ja korkeampien rakennusten alimmat kerrokset yleisesti alipaineisiksi ulkoilmaan ja mahdolliseen ryömintätilaan nähden.

Niin ikään Itä-Suomen yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa ”Painesuhteet rakennuksen ulkovaipan yli” (Seppänen, 2010) mitattiin kuntotutkimusten ja lämpökuvausten yhteydessä suuri otos eri vuosikymmenten eri tyyppisien rakennusten paine-eroja. Tutkimuksen tulosten perusteella on todettu seuraavaa: rakennuksissa on keskimäärin hieman liikaa alipainetta esimerkiksi Asumisterveysopas 2009- julkaisun mukaisiin suositushjearvoihin nähden, ylipaineisia rakennuksia oli vain 4 % kohteista, erittäin alipaineisia rakennuksia (yli 20 Pa) oli n. 10 % kohteista, myös ylimmissä kerroksissa muodostui alipainetta ulkoilmaan nähden, koneellisen poiston ilmanvaihdon kohteissa vallinnut keskimääräinen alipaine (9 Pa) on juuri ja juuri sopivissa rajoissa, yli 10 Pa:n alipaineet ovat seurausta koneellisen poistojärjestelmän virheellisestä suunnittelusta, toteutuksesta ja/tai huollosta.

Seuraavassa taulukossa on esitetty tutkimuksen yhteenvedon tulokset.

**Taulukko 2.4** Paine-eromittausten kohdekohtaiset keskimääräiset tulokset (Pa) ulkoilmaan nähden rakennustyypeittäin, ilmanvaihtotavoittain ja eri kerroksissa. Kerroksittaisissa tuloksissa on kyseessä ko. kohteen ko. kerroksen keskiarvo (Seppänen, 2010).

	Yhteensä		Painovoimainen poisto		Koneellinen poisto		Koneellinen tulo ja poisto	
			dp=-2 Pa, N= 23		dp=-9 Pa, N= 69		dp=-6 Pa, N= 91	
	Pa	kpl	Pa	kpl	Pa	kpl	Pa	kpl
<b>Omakotitalot</b>	-2	24	-1	10	-6	5	-2	9
<b>Rivitalot</b>	-7	53	-1	4	-8	43	-4	10
<b>Kerrostalot</b>	-19	16	-5	1	-21	10	-15	7
<b>Muut kohteet</b>	-6	70	-4	8	-5	11	-6	65
<b>Alin kerros</b>	-7	420	-3	27	-9	228	-5	165
<b>2. kerros</b>	-7	145	-3	22	-12	46	-6	86
<b>3. kerros</b>	-12	54	-5	10	-20	14	-11	30
<b>4. kerros</b>	-14	32	2	9	-25	16	-9	7
<b>5. kerros</b>	-15	13	7	2	-22	8	-12	3
<b>6. ja 7. kerros</b>	-14	12	8	1	-18	8	-12	3
Rakennusvuosikymmen								
1760-1940	-3	32	-2	13	-6	7	-2	13
1950-2000	-7	144	-2	10	-10	62	-6	78

Rakennusten painesuhteisiin liittyviä tutkimuksia on Suomessa tehty runsaasti. Tutkimukset ovat kuitenkin melkein yksinomaan lyhytaikaisia (< viikko) ja tehty usein jonkin muun tutkimuksen yhteydessä, kuten lämpökuvaus. Toisaalta esimerkiksi Kataisen ja Vähämaan tekemässä opinnäytetyön pitkäaikaisessa painesuhteiden mittauksessa kohteiden otoskoko on suppea. Kansainvälisesti ajateltuna rakennusten paine-eromittaukset näyttäisivät liittyvän lähes yksinomaan vaipan tiiviysmittausten ohessa tehtäviin paine-eroanalyysihin. Näin ollen kirjallisuudesta saatava tutkimusaineisto ei suoranaisesti anna tietoa suuren otannan pitkäaikaisista paine-eromittauksista. Voidaan siis todeta, että COMBI on ainakin rakennusten paine-eromittausten osalta ainutlaatuinen hanke Suomessa ja maailmalla.

## 2.1.2 Lämpö

Lämpö on fysikaalinen ilmiö, millä tarkoitetaan energian siirtymistä kulkeutumalla, johtumalla tai säteilemällä. Kulkeutuminen tarkoittaa lämmenneen väliaineen liikettä, jossa lämmönlähde on saanut väliaineen molekyyliden liikkeit nopeammaksi (molekyyliden energiantaso on noussut). Johtumisessa on myös kyse molekyyliden liikkeen nopeutumisesta (energiatason noususta), jossa kiinteän aineen väliset molekyylit siirtävät toisiinsa liike-energiaa. Säteilemällä siirtyvä lämpö perustuu infrapuna-alueen aallonpituuksilla liikkuvaan sähkömagneettiseen säteilyyn.

Energian siirtymisen määrää kuvaava suure on lämpömäärä, jolla ilmaistaan kappaleeseen varastoitunutta tai kappaleen luovuttamaa energian määrää. Mikäli kappaleen lämpötila muuttuu arvosta  $T_1$  arvoon  $T_2$ , niin kappaleeseen siirtynyt lämpömäärä lasketaan kaavalla:

$$Q = m \cdot c(T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

missä

$m$  on kappaleen massa, kg

$c$  on ominaislämpökapasiteetti massayksikköä kohti, J/(kg K)

Systeemiin voidaan tehdä myös työtä (yksikkö W), mikä muuttaa systeemin lämpötilaa. Tehty työ voi olla esimerkiksi kitkan tekemää työtä tai sähkövastuksen läpi kulkevan virran tekemää työtä. Kemiaalisissa reaktioissa systeemi voi vapauttaa tai sitoa tietyn lämpömäärän, jolloin puhutaan joko ekso- tai endotermisestä reaktiosta.

Lämpö siirtyy korkeammasta lämpötilasta kylmempään päin. Siirtyminen voi tapahtua johtumalla, säteilemällä tai kuljettumalla (konvektio). Johtumisessa energia siirtyy suoraan kahden tai useamman aineen kosketuspintojen kautta. Lämpösäteilyssä materiaali emittoi sähkömagneettista säteilyä. Konvektiossa energian siirtyminen tapahtuu virtaavan kaasun tai nesteen mukana.

Johtuminen on rakennusfysiikassa keskeinen ilmiö. Lämmön johtumista tapahtuu rakennuksen runkorakenteissa eri materiaalien välillä. Homogeenisessa ja isotrooppisessa materiaalissa johtumisesta johtuvaa lämpövirtaa ( $W/m^2$ ) kuvataan Fourier'n lailla:

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2.3)$$

missä

$\lambda$  on materiaalin lämmönjohtavuus, W/(mK)

Materiaalin ominainen lämmönjohtavuus ei ole vakio kaikilla lämpötiloilla ja kosteuspi-toisuuksilla, vaan se vaihtelee vallitsevien olosuhteiden mukaan. Tampereen teknillisen yliopiston tutkimuksessa ”Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona” (Vinha, J. et al., 2005) tutkittiin eri rakennusmateriaalien ominaisuuksia lämpötila-alueella  $-10 - +23\text{ °C}$  ja kosteusalueella  $33 - 97\text{ % RH}$ :ta. Tutkimuksessa koekappaleita altistettiin vain niille olosuhteille, mille ne käyttötarkoituksensa mukaan todennäköisesti joutuvat. Tutkimuksen mukaan koekappaleiden lämmönjohtavuus  $20\text{ °C}$  lämpötilassa oli keskimäärin  $10-15\text{ %}$  suurempi, kuin  $-10\text{ °C}$  lämpötilassa. Hygroskooppisilla materiaaleilla  $97\text{ %}$ :n RH:ssa ilmastoituna koekappaleiden lämmönjohtavuus oli  $10-20\text{ %}$  suurempi, kuin kuivien koekappaleiden. Tutkimuksessa ei koekappaleita altistettu Suomessa esiintyville ääriolosuhteille, joten todellista vaihteluväliä materiaalien ominaisuuksille eri olosuhteissa ei saatu.

Fourierin laista nähdään edellä mainittu ominaisuus, missä lämpövuoto on kuumemmasta kylmempään (gradientin vastakkaiseen suuntaan). Usein ongelmia yksinkertaistetaan muodostamalla lämpövirralle yksikulotteinen (yksisuuntainen) siirtymä. Tällöin lämpövuon kaava saa muodon:

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.4)$$

Normaalisti lämpöön liittyvät ongelmat eivät kuitenkaan ole yksiulotteisia. Yleinen ratkaisu kolmiulotteiselle lämmönjohtavuudelle saadaan yhdistämällä kaavat 2.3 ja 2.23. Tällöin saadaan:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

missä

$c$  on materiaalin lämpökapasiteetti, J/(kg K)

$\rho$  on materiaalin tiheys, kg/m<sup>3</sup>.

Jotkin ongelmista voidaan ratkaista käyttämällä kaksiulotteista mallia systeemin tasapainotilassa.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.6)$$

Mikäli lämmönjohtavuus on vakio koko lämpövirran alueella, saadaan aikaiseksi yksinkertainen Laplacen yhtälö, millä mallinnetaan tasapainotilan potentiaaleja:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (2.7)$$

Tässä Laplacen yhtälö on esitetty karteesisen koordinaatiston muodossa. Matematiikassa yhtälö esitetään usein käyttäen nabla-operaattoria.

Rakennusfysiikassa konvektiolla tarkoitetaan ilmamassojen kuljettamaa lämpöä tai kosteutta. Rakennuksissa tapahtuu kahdenlaista konvektiota: luonnollista ja pakotettua. Luonnollinen konvektio johtuu ilmamassojen massojen eroista (tiheysero), mikä taas johtuu lämpötilaeroista. Pakotetun konvektion saa aikaan tuuli ja erilaiset tuulettimet kuten ilmanvaihtolaitteet. Konvektiolla tapahtuva lämpövirta ilmaistaan seuraavalla kaavalla.

$$q_c = h \cdot (T_s - T_a) \quad (2.8)$$

missä

$q_c$  on konvektionaalinen lämpövirta, W/m<sup>2</sup>

$h$  on konvektion lämmönsiirtokerroin, W/(m<sup>2</sup>K).

Lämmönsiirtokertoimelle  $h$  löytyy erilaisia laskentakaavoja eri kirjallisuuslähteistä. Kirjassa ”Introduction to building physics” (Hagentoft 2001) kertoimelle on annettu kaavoja, kun ilman nopeus  $v$  (m/s) tunnetaan. Pintaa kohtisuoraa vastaan oleva pakotettu konvektio

antaa kertoimelle  $h$  arvot  $6+4 \cdot v$ , kun  $v \leq 5$  m/s ja  $7,41 \cdot v^{0,78}$ , kun  $v \geq 5$  m/s. Tämän lisäksi kirjassa on annettu rakennuksen ulkokuoren ulkopintaan (seinä, katto) vaikuttavan tuulen aiheuttama kerroin  $h$ , kun tuulen nopeus tunnetaan. Nämä kertoimet ovat  $5+4,5 \cdot v-0,14 \cdot v^2$ , kun  $v \leq 10$  m/s ja  $5+1,5 \cdot v$ , kun  $v \leq 8$  m/s. Luonnollisessa konvektiossa rakennuksen sisäpintoilla vaikuttava konvektio, ja siitä aiheutuva kerroin  $h$  ilmaistaan kaavalla:

$$h = 2 \cdot |T_a - T_s|^{1/4} \quad (2.9)$$

Lämmön siirtyminen johtumalla tai konvektiolla vaatii jonkinlaisen lämpögradientin. Lämpösäteilyssä tällaista ei tarvita. Tässä työssä keskitytään vain sellaiseen lämpösäteilyyn tapaukseen, missä säteily tapahtuu pintojen välillä ja pintojen välissä oleva ilma ei vaikuta säteilyyn.

Säteily voidaan ajatella olevan fotonien tai sähkömagneettisten aaltojen etenemistä. Aallonpituuksia on esitetty kuvassa 2.4. Aallonpituuden ja taajuuden suhde kuvataan seuraavan kaavan mukaisesti.

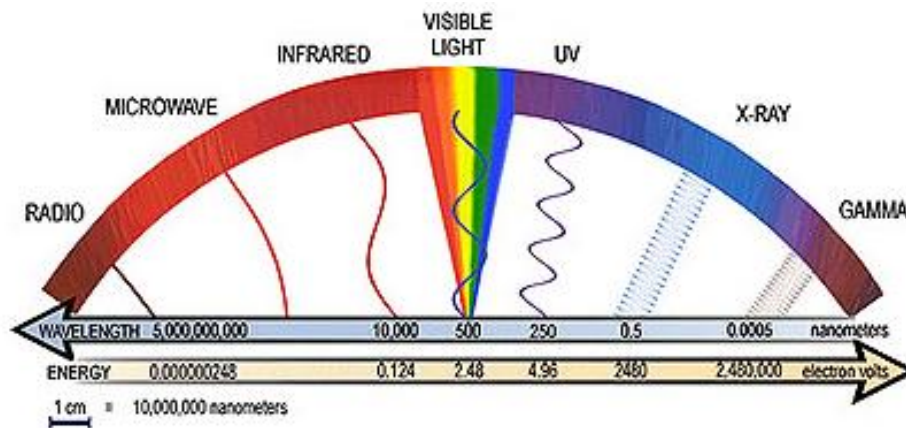
$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.10)$$

missä

$\lambda$  on aallonpituus,  $\mu\text{m}$

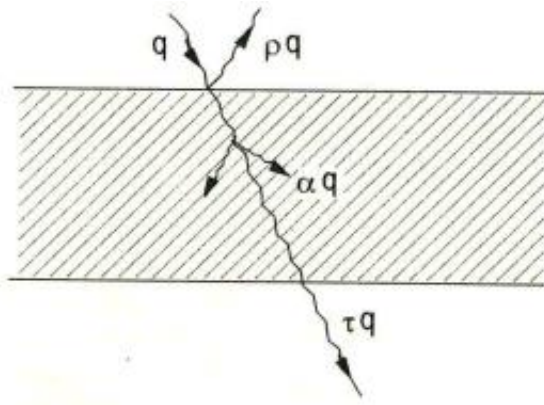
$c$  on valonnopeus väliaineessa, m/s

$\nu$  on taajuus, 1/s.



**Kuva 2.4** Elektromagneettisen säteilyn spektri. (Chandra-observatorion internetsivut, 2016)

Johonkin pisteeseen kohdistuva kokonaissäteily on usein yhdistelmä eri aallonpituuden säteilyitä monesta eri suunnasta. Kun säteilyenergia kohtaa jonkin pinnan, osa säteilystä heijastuu materiaalin pinnalta pois, osa imeytyy materiaaliin ja osa läpäisee materiaalin kuvan 2.5 mukaisesti.



**Kuva 2.5** Säteilyn jakaantuminen sen kohdatessa materiaalin pinnan (Hagentoft, 2012).

Säteilyn heijastunutta osuutta kuvataan heijastuskertoimella  $\rho$ , absorboitunutta osuutta absorptiokertoimella  $\alpha$  ja läpi siirtyvää osuutta tunkeutumiskertoimella  $\tau$ . Kuvasta 2.5 nähdään, että tulee toteutua  $\rho + \alpha + \tau = 1$ . Rakennusfysikaalisissa sovelluksissa kiinteiden aineiden ei oleteta läpäisevän säteilyä, eli toisin sanoen  $\tau = 0$ . Lasi on kuitenkin yksi tärkeä poikkeus. Lasi läpäisee lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä.

### 2.1.3 Suhteellinen kosteus

Ilmassa olevaa vesihöyryä kutsutaan ilman kosteudeksi. Ilman lämpötila määrittelee sen, kuinka paljon ilmassa voi olla vesihöyryä. Ilman kylmetessä se menettää kykyään pidättää vesihöyryä.

Suhteellinen kosteus tarkoittaa mitatun absoluuttisen kosteuden ja kyllästyskosteuden suhdetta. Kaavana tämä tarkoittaa seuraavaa:

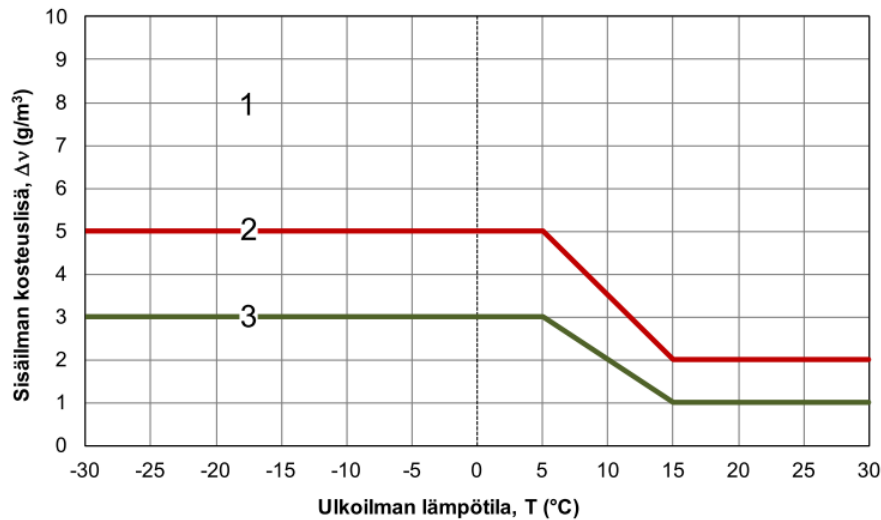
$$RH = \frac{p_{(H_2O)}}{p^*_{(H_2O)}} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

missä

$p_{(H_2O)}$  on veden osapaine kaasuseoksessa

$p^*_{(H_2O)}$  on vesihöyryllä kylläisen ilman veden osapaine kaasuseoksessa kyseisessä lämpötilassa eli kyllästysosapaine

Sisäilman kosteuslähteitä ovat muun muassa ulkoilman kosteus ja käytöstä johtuvat kosteuslisät, kuten pyykinpesu, peseytyminen ja siivous. Rakennuksen käyttäjien tottumuksilla ja rakennuksen käyttötarkoituksen mukaisella käytöllä voi olla sisäilman kosteuden kannalta suuri merkitys ja johtaa sisäilman kosteuspitoisuuden lisääntymiseen. Tätä asiaa on käsitelty kuvassa 2.6 ja taulukossa 2.5.



**Kuva 2.6** Sisäilman kosteussisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona (RIL 107, 2012).

**Taulukko 2.5** Sisäilman kosteussisän perusteella määritettyihin kosteusluokkiin kuuluvat rakennustyyppit (RIL 107, 2012).

Kosteusluokka	Kosteussisän mitoitusarvo talvella ( $T \leq 5^\circ\text{C}$ )	Rakennustyyppi <sup>(3,4)</sup>
1	$> 5 \text{ g/m}^3$ <sup>(1)</sup>	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
2	$5 \text{ g/m}^3$	Asuinrakennukset, toimisto- ja liikeyrakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat <sup>(5,6)</sup> , kylmä- ja pakkahuoneet <sup>(5,6)</sup> , talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
3	$3 \text{ g/m}^3$ <sup>(2)</sup>	Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset

Liian kuiva sisäilma aiheuttaa hengitysteiden, limakalvojen ja ihon ärsytysoireita. Toisaalta liian kostea huoneilma saattaa johtaa pahimmillaan kosteus- ja homevaurioihin rakenteissa ja tätä kautta erittäin vakaviin terveysongelmiin (Hengitysliitto, 2016).

Talviaikaan huoneilma on kuivaa ( $< 40\% \text{ RH}$ ) ja voi laskea jopa alle  $20\% \text{ RH}$ :n. Sopiva huoneilman suhteellinen kosteus talviaikaan on  $20\text{--}40\% \text{ RH}$ . Talviaikaan suhteellinen kosteus sisällä on liian korkea, mikäli suhteellinen kosteus  $> 45\% \text{ RH}$ . Kesällä huoneilman suhteellinen kosteus noudattaa hyvin ulkoilman kosteuspitoisuuksia ( $50\text{--}70\% \text{ RH}$ ). Rakennusten sisäilman suhteellinen kosteus ei saa pitkäkestoisesti olla niin korkea, että vaarana on rakenteissa ja materiaalien pinnoilla mikrobikasvun riski (Hengitysliitto, 2016).

Päiväkotien sisäilmatutkimus- tutkimuksessa (raportti 2.4.2012) tutkittiin yhteensä 25 eri päiväkotia viidellä eri paikkakunnalla. Kohteiden sisäilmamittaukset suoritettiin kerta-

luontoisesti vuodenaikamittauksina sekä jatkuvina, viikon kestävinä mittauksina. Raportin mukaisesti suhteellisen kosteuden mittaustulokset olivat odotetun kaltaiset: talvikaan sisäilman suhteellinen kosteus laski alhaiselle tasolle johtuen ulkoilman absoluuttisen kosteuden laskusta lämpötilan laskiessa. Vastaavasti kesäaikaan sisätilojen suhteellinen kosteus nousi ja kevät-/syyskauden arvot olivat edellä mainittujen välissä. Mittaustulokset on nähtävissä taulukossa 2.6.

**Taulukko 2.6** Suhteellisen kosteuden eri vuodenaikoina mitattuja arvoja 25 eri päiväkodissa (Päiväkotien sisäilmatutkimus, 2012).

	Suhteellinen kosteus			
	minimi	maksimi	keskiarvo	mediaani
Kesä	21 %	76 %	50 %	53 %
Kevät/syys	15 %	56 %	31 %	28 %
Talvi	9 %	34 %	20 %	19 %

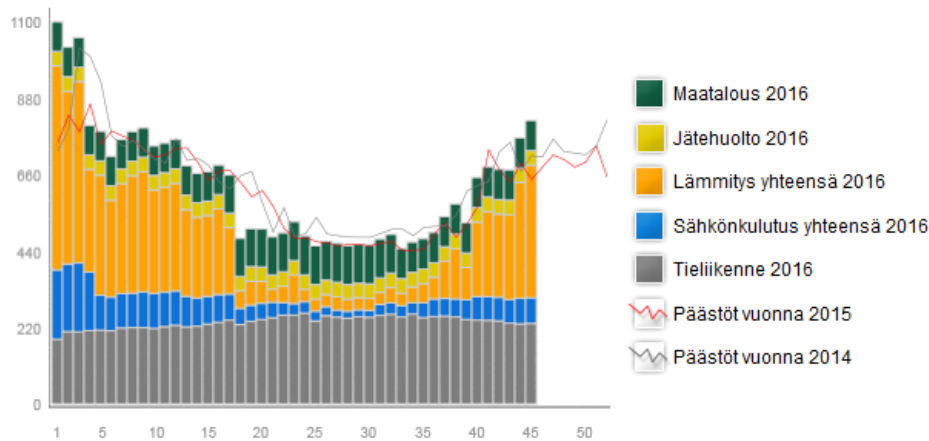
Rakennusten ilmanvaihdolla on sisäilman suhteelliseen kosteuteen keskeinen osa. Oikein säädetyllä ja käytetyllä ilmanvaihdolla voidaan merkittävästi vähentää liiallisen sisäilman kosteuden syntymistä ja toisaalta varmistaa liian kuivan hengitysilman syntymisen estäminen. Ilmanvaihtolaite voidaan varustaa niin kutsutulla hygroskooppisella kennolla. Kenno on usein rei'itetty alumiininen ”kiekko”, jonka tehtävänä on kerätä ulos puhallettavasta ilmamassasta kosteutta kondensoitumisen avulla.

#### 2.1.4 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi on normaaliolosuhteissa huonosti reagoiva myrkytön kaasu. Hiilidioksidi koostuu hiilestä ja hapesta ja sen kemiallinen molekyylikaava on CO<sub>2</sub>. Ihminen tuottaa hiilidioksidia uloshengityksen tuotteena (soluhengitys). Yhteiskunnallisesti hiilidioksidipäästöjä tuottavat muun muassa maatalous, lämmitysenergian tuotanto ja tieliikenne, joista maailmanlaajuisesti suurimpana on lihatuotannosta johtuvat hiilidioksidipäästöt.

Hiilidioksidi on merkittävä ilmastoja lämmittävä kasvihuonekaasu siitä syystä, että se päästää näkyvän valon lävitseen, mutta absorboi erittäin voimakkaasti infrapuna- eli lämpösäteilyä. Vuonna 2016 Suomen hiilidioksidipäästöt (tilanne marraskuussa 2016) olivat noin 809 kilotonnia (CO<sub>2</sub>-raportti.fi, 2016). Suomen viikottaiset CO<sub>2</sub>-päästöt vuosina 2014-2016 voidaan nähdä kuvan 2.7 kaaviosta.





**Kuva 2.7** Viikoittaiset CO<sub>2</sub>-päästöt kilotonneissa koko Suomessa vuosina 2014-2016 (CO<sub>2</sub>-raportti.fi, 2016).

Suurina pitoisuuksina hiilidioksidi on haitallista ihmisille (EPA, 2016). Hiilidioksidia mitataan tilavuuden miljoonasosissa (ppm). Tällöin 1 %:n pitoisuus hiilidioksidia tarkoittaa 10 000 ppm pitoisuutta. Taulukossa 2.7 on käsitelty hiilidioksidipitoisuuksien vaikutusta ajan funktiona ihmiselle.

**Taulukko 2.7** Maksimiaika fysiologisten oireiden alkamiselle ihmisissä hiilidioksidialtistuksessa (EPA, 2016).

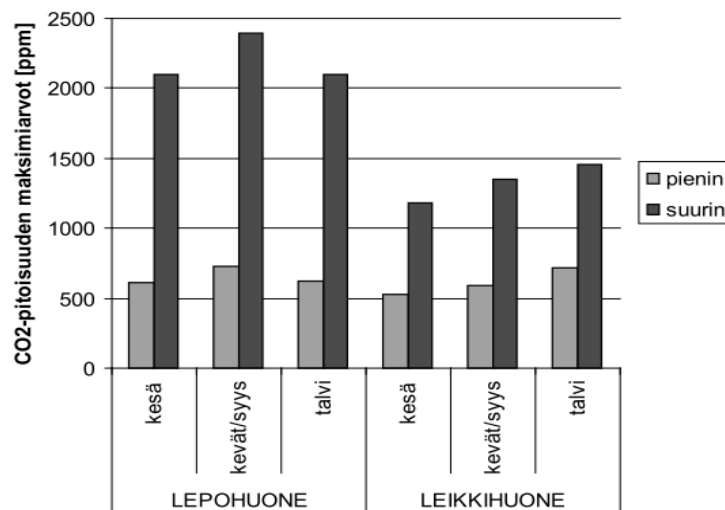
Hiilidioksidipitoisuus ilmassa (tilavuusprosentteina)	Maksimi vaikutusaika (minuuteissa)
0,5	loputtomasti
1,0	loputtomasti
1,5	480
2,0	60
3,0	20
4,0	10
5,0	7
6,0	5
7,0	alle 3

Suomen rakentamismääräyskokoelman D2 mukaisesti rakennus on suunniteltava siten, että sisäilman hiilidioksidin pitoisuus tavanomaisissa sääoloissa ja huonetilan käyttöaikana ei saa ylittää arvoa 2160 mg/m<sup>3</sup> (1200 ppm). Päiväkotien sisäilmatutkimus- tutkimuksessa mitattiin myös päiväkotien sisäilman hiilidioksidipitoisuuksia. Tutkimustuloksia on nähtävissä kuvissa 2.8 ja 2.9. Tutkimuksessa mitattuja hiilidioksidipitoisuuksia verrattiin Suomen rakentamismääräyskokoelman D2 mukaiseen maksimipitoisuuden oh-

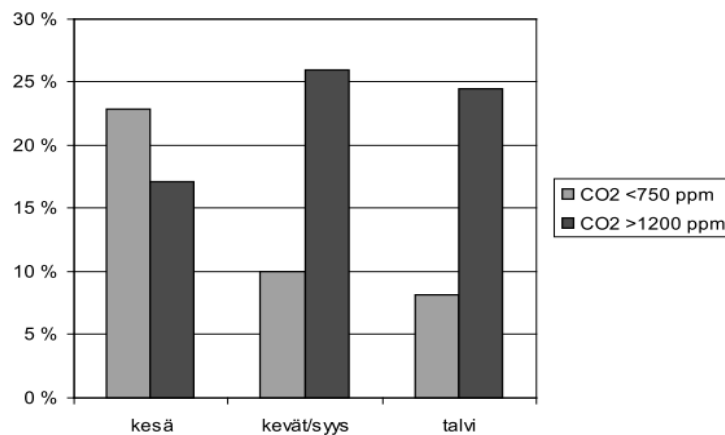
jearvoon (1200 ppm) sekä Sisäilmastoluokitus 2008- julkaisun määrittelemään S1- luokan (< 750 ppm) hiilidioksidipitoisuuteen. Tutkimuksessa todettiin hiilidioksidin mittausten osalta seuraavaa:

*”Yleisesti pitoisuudet olivat lepohuoneissa korkeampia, kuin leikkihuoneissa. Samoin talvi- ja kevät-/syyskaudella pitoisuudet nousivat korkeammiksi, kuin kesällä.”*

*”Hiilidioksidipitoisuuksien osalta tilanne oli paras kesäaikaan, jolloin suurimmat maksimi-arvot jäivät alhaisemmiksi, kuin muina vuodenaikoina. Kesällä pitoisuudet pysyivät useammin myös Sisäilmastoluokituksen mukaisessa erinomaisessa arvossa. Tämän voi ainakin osittain olettaa johtuvan kesäaikaisesta mahdollisuudesta ikkunatuuletukseen ilman vetoriskiä samoin kuin siitä, että kesäaikaan oleskellaan enemmän ulkona. Henkilömäärät mitatuissa tiloissa eivät juurikaan poikenneet toisistaan mittausten aikana eri vuodenaikoina.”*



**Kuva 2.8** Hiilidioksidipitoisuuksien mitatut maksimi-arvot (Päiväkotien sisäilmatutkimus, 2012).



**Kuva 2.9** Hiilidioksidipitoisuuksien maksimi-arvojen osuudet verrattuna D2:n ja Sisäilmastoluokituksen (Päiväkotien sisäilmatutkimus, 2012).

### 2.1.5 Radon

Radon (Rn-222) on uraanisarjaan kuuluva radioaktiivinen kaasu. Radonia syntyy uraanista (U-238) useiden hajoamisien kautta. Hajoamissarjassa radonia edeltävä alkuaine on radium (Ra-226). Lopputilanteessa radon hajoaa useiden välivaiheiden kautta stabiiliksi lyijyksi (Pb-206).

Geologisten ja ilmastollisten syiden vuoksi Suomessa radonpitoisuudet ovat usein muita maita korkeammat (STUK, 2016). Keskimääräinen radonpitoisuus suomalaisissa asunnoissa on noin 96 becquerelia kuutiometrissä ilmaa (Bq/m<sup>3</sup>), kuten taulukosta 2.8 voidaan nähdä. Tämä vastaa noin kahden millisievertin säteilyannosta vuodessa. Vertailun vuoksi mainittakoon: asuntojen keskimääräinen radonpitoisuus on Ruotsissa 108, Norjassa 106, Tanskassa 77, Saksassa 50, Ranskassa 66 ja Englannissa 20 Bq/m<sup>3</sup> (STUK, 2016). Alla olevassa taulukossa on esitetty Säteilyturvakeskuksen vuosien 2006 – 2007 otantatutkimuksen tuloksia radonpitoisuuksien keskiarvoista ja tiettyjen pitoisuuksien ylittävistä prosentiosuuksista suomalaisissa pien- ja kerrostaloissa.

**Taulukko 2.8** Radonpitoisuuden keskiarvot ja ylitysprosentit sekä arviot sellaisten talojen lukumäärästä, joissa radonpitoisuudet ylittävät 200, 400 ja 800 Bq/m<sup>3</sup> (STUK, 2016).

	Keskiarvo Bq/m <sup>3</sup>	>200 Bq/m <sup>3</sup> % (asuntoa)	>400 Bq/m <sup>3</sup> % (asuntoa)	>800 Bq/m <sup>3</sup> % (asuntoa)
Pientalot	121	15,1 (204 000)	3,8 (51 000)	0,8 (11 000)
Kerrostalot	49	1,5 (16 000)	0,8 (8000)	0
Kaikki asunnot	96	10,4 (220 000)	2,7 (59 000)	0,5 (11 000)

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaisesti rakennus tulee suunnitella siten, että sisäilman radonpitoisuus ei ylitä arvoa 200 Bq/m<sup>3</sup> (vuosikeskiarvo).

## 2.2 Lämmön ja kosteuden siirtyminen

Energian siirtymisen prosesseja rakennuksen komponenttien sisällä ja välillä eri lämpötiloissa kutsutaan lämmön siirtymiseksi. Lämmön siirtyminen voidaan määritellä kahden alueen välisestä lämpötilaerosta johtuvana energian siirtymisenä alueesta toiseen. Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja siirtyvän aineen mukana (konvektio). Johtumisessa energian siirtyminen on surausta molekyylien sisäisten liikkeiden liike-energian siirtymisestä aineen molekyylien välillä. Johtumisessa ei kuitenkaan tapahdu nettomääräistä molekyylien siirtymistä energian siirtymisestä huolimatta (Hagentoft, 2012).

Rakennusfysiikassa *konvektio* tarkoittaa ilman tai joskus veden mekaanista liikettä. Konvektion mukana siirtyvä lämpöenergia on keskeinen lämmön siirtymisen mekanismi rakennuksissa. Lämmön kuljettuminen virtaavan aineen mukana on mahdollista johtuen aineen ominaislämpökapasiteetista, mikä tarkoittaa aineen kykyä varastoida lämpöä. Kapillaarisen kosteuden siirtymisen, diffuusion ja ilmavirtauksen konvektion kuljettama lämpöenergia lasketaan massavirran entalpian avulla. Yleensä rakennusfysikaalisissa laskelmissa oletetaan vallitsevan vakiopaine, jolloin laskelmat supistuvat siirtyvän energian laskemiseksi. Tämä tarkoittaa tilannetta, jossa massavirran tiheys kerrotaan virtaavan aineen tiheydellä, ominaislämpökapasiteetilla sekä virtaavan aineen lämpötilalla, minkä lisäksi tulee ottaa huomioon vielä kosteuden faasimuutokset (Laukkarinen, 2015).

Lämmönsiirto materiaalin ja ympäröivän aineen välillä sisältää lämmön johtumisen sekä konvektion. Materiaalien rajapinnoilla ilman käyttäytymiselle on olemassa erilaisia malleja, mutta perustapauksessa ilman virtausnopeuden oletetaan olevan nolla aivan materiaalin rajapinnalla, mutta kasvavan asteittain ilmakerrokseen päin siirryttäessä. Tällöin lämpö siirtyy johtumalla materiaalista ilmaan, mutta ilmamassaa kohti siirryttäessä kasvava konvektion määrä tehostaa lämmön siirtymistä ilman ja pinnan välillä. Konvektion ja johtumisen osuudet riippuvat ainakin virtauksen tyypistä (laminaarinen, turbulentti), suunnasta sekä virtaavan aineen ominaisuuksista (Laukkarinen, 2015).

Lämmönsiirto pinnan ja ympäröivän ilman välillä voidaan käsitellä pinnan konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen avulla.

$$q_{s,cv} = h_{cv} \Delta T \quad (2.12)$$

missä

$q_{s,cv}$	on lämpövirran tiheys pinnan ja ympäröivän ilman välillä, W/m <sup>2</sup>
$h_{cv}$	on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, W/(m <sup>2</sup> K)
$\Delta T$	on lämpötilaero pinnan ja ympäröivän ilman välillä, K.

Rakennusfysiikassa ilman ja kosteuden siirtymistä kutsutaan massan siirtymäksi. Ilman liikkuvuutta aiheuttaa kolme päätekijää: lämpötilaeroista aiheutuvat ilmanpaineen tiheys-erot, sää (tuuli) aiheuttamat paine-erot sekä laitteistojen (IV, tuulettimet yms.) aiheuttamat paine-erot.

Rakennuksen vaipan läpi ilmaa virtaa ilmanvaihtokanavien, läpäisevien materiaalien, halkeamien ja rakojen läpi/kautta. Kosteutta voi kulkeutua höyrymäisessä tai nestemäisessä muodossa. Kosteuden siirtymistä aiheuttaa mm. (Hagentoft, 2012):

- Diffuusio
- Konvektio
- Kapillaarisuus
- Tuulen paine

- Painovoima (veden paine)

*Diffuusio* on tasapainottumisprosessi, mikä tässä tapauksessa tarkoittaa vesihöyryn osapaine-eroista johtuvaa molekyylien liikettä, jossa vesimolekyylit liikkuvat suuremmasta konsentraatiosta pienempään suuntaan. Vesihöyryn diffuusion lisäksi myös lämmön johtuminen on esimerkki diffuusioliikkeestä.

Matemaattisesti vesihöyryn diffuusio jonkin toisen materiaalin läpi voidaan kuvata Fick'n lain avulla (kaava 2.13).

$$\vec{g}_{dif} = -\delta_{v,mat} \nabla v \quad (2.13)$$

missä

$\vec{g}_{dif}$  on diffuusiovirran tiheys, kg/(m<sup>2</sup>s)

$\delta_{v,mat}$  on väliaineen vesihöyrynläpäisevyys, m<sup>2</sup>/s

$v$  on vesihöyrypitoisuus, kg/m<sup>3</sup>.

Vesihöyrynläpäisevyys voi olla eri materiaaleissa joko samanlainen tai erilainen eri suuntiin (isotrooppisuus/anisotrooppisuus). Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys pystytään kuvaamaan myös diffuusiovastuskertoimen (kaava 2.14) tai suhteellisen diffuusiovastuksen (kaava 2.15) avulla.

$$\delta_{v,mat} = \frac{\delta_{v,air}}{\mu} \quad (2.14)$$

missä

$\delta_{v,air}$  on paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys, noin 0,000 025 m<sup>2</sup>/s

$\mu$  on materiaalin diffuusiovastuskerroin, -.

$$s_d = \mu d \quad (2.15)$$

missä

$s_d$  on suhteellinen diffuusiovastus, m

$d$  on materiaalikerroksen paksuus, m.

Materiaalipinnan ja sitä ympäröivän ilman välillä vesihöyryn siirtyminen voidaan kuvata kaavan 2.16 avulla.

$$g_s = \beta \Delta v \quad (2.16)$$

missä

$g_s$  on kosteusvirta pinnan ja ympäröivän ilman välillä,  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$

$\beta$  on pinnan kosteudensiirtokerroin,  $\text{m/s}$

$\Delta v$  on vesihöyryn pitoisuusero pinnan ja ympäröivän ilman välillä,  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ .

Vesihöyryn siirtyminen pinnan ja sitä ympäröivän ilman välillä on mahdollista kirjoittaa myös käyttäen vesihöyryn osapainetta ajavana potentiaalierona. Pinnan kosteudensiirtokerroimen käänteisluku on pinnan vesihöyrynvastus. Vapaalle vesipinnalle haihduttava pinta-ala saadaan suoraan veden pinta-alana, mutta huokoiselle materiaalille käytettävät kertoimet ovat erinäisiä tehollisia arvoja, koska haihduttavan vesipinnan lisäksi materiaalien rajapinnoilla on myös runkomateriaalin pintaa. Huokoisessa materiaalissa lisäksi myös vesimolekyylien ja runkoaineen väliset voimat voivat vaikuttaa vesimolekyylien irtoamisnopeuteen. Vesihöyryn haihtuminen ja tiivistyminen sitovat/vapauttavat lämpöä (Laukkarinen, 2015).

*Konvektiolla* eli ilmanvaihtuvuuden mukana liikkuvaa kosteutta voidaan yksinkertaisissa tapauksissa arvioida kaavan 2.17 avulla.

$$G = n\Delta v \quad (2.17)$$

missä

$G$  on ilmanvaihtuvuuden aiheuttama kosteuden tuotto ja poisto,  $\text{kg}/(\text{m}^3\text{s})$

$n$  on ilman vaihtuvuutta kuvaava kerroin,  $1/\text{h}$

$\Delta v$  on ilman vesihöyrypitoisuusero tutkittavien ilmatilojen välillä,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Kaava 2.17 ei sovellu hetkellisien olosuhdemuutosten tarkasteluun (Korkeamäki, 2010).

*Kapillaarisuudella* tarkoitetaan nestemäisen veden siirtymistä huokoisen materiaalin pintojen ja vesimolekyylien välisen adheesion ja toisaalta vesimolekyylien välisen koheesion vaikutuksesta. Tällaisia ovat pintadiffuusio materiaalihuokosten pinnalla sekä kapillaarivirtaus vedellä täyttyneissä huokosputkissa. Koska materiaalien huokosrakennetta ei käytännössä voida tuntea kovin tarkasti, veden kapillaarinen liike kuvataan kontinuumihypoteesin pohjalta, missä fluidi (vesi) oletetaan jatkuvaksi: tiheyden, paineen sekä lämpötilan kaltaisten ominaisuuksien katsotaan olevan määriteltäviä mielivaltaisen pienissä tilavuuksissa. Kontinuumihypoteesi antaa todella tarkkoja arvioita fluidien todellisesta käyttäytymisestä oletuksella, että tarkastelu pidetään selvästi molekyylin kokoa suuremmissa mitoissa.

## 2.3 Energian ja aineen säilyminen

Energian ja aineen säilymisen lait auttavat meitä päättämään rakennusten fysikaalisia ominaisuuksia sen eri komponenteissa. Molemmat lait sanovat, että energiaa tai ainetta ei voi hävitä, vaan nettomääräisen energian tai aineen virtaus johonkin tilavuuteen tulee tasapainottua energian tai aineen varastoitumisella.

Säilymlakien ja lämmön sekä aineen virtauksien ilmauksilla voidaan muodostaa vallitsevat matemaattiset lausekkeet lämpötilalle, ilman paineelle ja kosteudelle. Monissa sovelluksissa on tarkoituksenmukaista ajatella lämmön ja aineen virtaukset yksiulotteisiksi. Rakennusfysiikan monissa sovelluksissa kuten esimerkiksi kahden eri materiaalin välisissä liitoksissa, nurkissa ja perustuksissa tulee kuitenkin analyysit virtauksille olettaa moniulotteisiksi ilmiöiksi.

Lämmön tai aineen virtaukset (vuo) kuvataan vektorisuureina moniulotteisessa avaruudessa. Näin ollen voidaan todeta, että lämpö- ja ainevuolla on olemassa fysikaalisissa ongelmissa suunta (vektoriikulma) ja suuruus (magnitudi). Edellä mainittu fysikaalinen teoria on esitetty seuraavaksi käyttäen hyväksi lämmön virtausvektoreita, mutta teoria on validi myös kosteuden ja ilman virtauksille.

Lämpövirtausvektoria merkitään merkinnällä  $\mathbf{q}$ . Virtauksen suunta voidaan ilmaista käyttämällä vektorin x-, y- ja z-suuntia.

$$\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z) \quad (2.18)$$

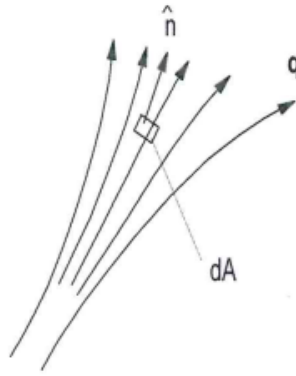
Vektorin pituus ilmaisee virran suuruuden:

$$|\mathbf{q}| = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2} \quad (2.19)$$

Mikäli tarkastellaan lämpövirtaa tietyn alueen läpi,  $dA$  ( $m^2$ ), tulee ottaa huomioon virtauksen ja alueen normaalivektorin  $\hat{n}$  suunnat (kuva 13). Tällöin nettomääräinen lämpövirta,  $d\phi$  (W), elementin läpi saa muodon:

$$d\phi = \mathbf{q} \cdot \hat{n} \cdot dA \quad (2.20)$$

Jotta voidaan ottaa huomioon lämpövirran ja tason välinen kulma, on kaavassa 2.20 käytetty  $\hat{n}$  ja  $\mathbf{q}$  välistä skalaarituloa. Kuvassa 13 näkyy lämpövirtavektorit kolmiulotteisissa tapauksissa. Nämä voivat esittää esimerkiksi lämpövirtaa tiettyssä materiaalissa tai rakennuksen rakenteessa.



**Kuva 2.10** Kolmiulotteinen lämpövirta. Lämpövirta tasoelementin läpi,  $dA$ , normaalivektorilla  $\hat{n}$  (Hagentoft, 2012).

Energian säilymisen vaatimus pienelle elementille voidaan osoittaa. Nettomääräinen lämmön sisään virtaus (virtaus sisään – virtaus ulos) määrittää varastoituvan lämmön määrän tietyssä tilavuudessa. Matematiikan työkaluja käyttäen nettomääräinen lämpöteho tilavuusyksikköä kohti ( $\text{W}/\text{m}^3$ ) saadaan lämpövirran jakaantumisen divergenssistä. Tämä ilmaistaan lämpövirtavektorin ja gradienttioperaattorin ( $\nabla$ ) välisellä skalaaritulolla:

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}, \frac{\partial q_y}{\partial y}, \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \cdot \mathbf{q} \quad (2.21)$$

Koko nettomääräinen lämpövirta  $d\phi$  (W) pieneen elementtiin saa muodon:

$$d\phi = -\nabla \cdot \mathbf{q} \cdot dV \quad (2.22)$$

Lämpövirran nettomääräinen sisään virtaus on määritelty lämmön varastoitumisella materiaaliin. Tällöin lämpötila muuttuu:

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) \quad (2.23)$$

missä

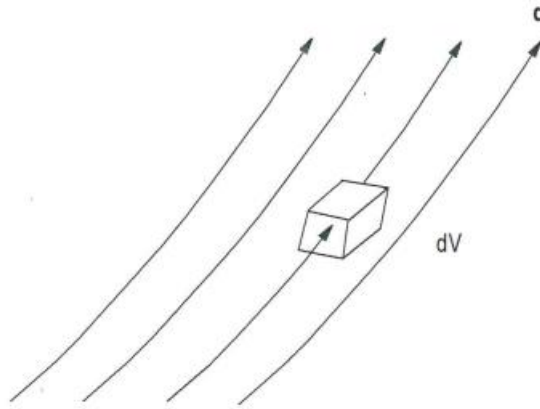
$c$  on materiaalin ominaislämpökapasiteetti,  $\text{J}/(\text{kg K})$

$\rho$  on materiaalin tiheys,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Kaavan 2.23 suluissa oleva termi kuvastaa varastoituneen energian määrää tilavuusyksikköä kohti. Ajasta riippumattomassa tilanteessa (stationääritila) kaavan 2.23 oikea puoli saa arvon nolla ( $\partial T = 0$ ). Tämä tarkoittaa sitä, että stationääritilassa tilavuusyksikköön varastoituva lämpöenergia on nolla.



Lämpövirtaa voi olla tarkasteltavan tilavuuspartikkelin läpi myös stationääritilassa, mutta silloin partikkeliin tuleva ja lähtevä lämpövirta ovat yhtä suuret, jolloin partikkeliin siirtyvä tai sieltä poistuva nettolämpöenergia on nolla.



**Kuva 2.11** Kolmiulotteinen lämpövirta, pieni tilavuuselementti  $dV$  lämpövirran alueessa (Hagentoft, 2012).

Kosteudelle käytetään aineen säilymisen lakia, jolloin saadaan:

$$-\nabla \cdot \mathbf{g} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (2.24)$$

missä

$w$  on materiaalin kosteuspitoisuus tilavuusyksikköä kohti,  $\text{kg/m}^3$

$\mathbf{g}$  on kosteuden virtausvektori,  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ .

Kaavat 2.23 ja 2.24 kuvaavat tilannetta jokaisessa tutkittavassa tilavuuselementissä esimerkiksi rakennuksen komponentin sisällä. Usein on tarkoituksenmukaista tarkastella rakennuksissa *tasojen* lämpötiloja ja ilman lämpötiloja *tuuletetuissa tiloissa*. Tasoelementtiin varastoituvan lämpöenergian määrä on nolla, koska tasoelementillä ei ole tilavuutta (toisin sanoen tasoelementin paksuus on 0). Lämpöä ei voi varastoitua tasoelementtiin johtuen elementin nolatilavuudesta. Tämän lisäksi, jos ei oteta tuuletetun tilan lämmön varastointikapasiteettia huomioon, voidaan myös tuuletustilaan varastoituvan lämpöenergian olettaa olevan nolla.

Kosteuden varastoituminen tasoon on myös nolla. Tuuletetun tilan lämmön varastoimisen nollakapasiteetti ei kuitenkaan ole käypä ajatusmalli mietittäessä kosteutta, sillä tilan il-malla on kyky varastoida kosteutta.

## 3. RAKENNUSFYSIKAALISET MITTAUKSET

### 3.1 Paine-eron mittaaminen

Paine-eron mittaamisessa suoritetaan kahden toisistaan erillään olevan ilmatilan mittaust, jonka jälkeen saatuja arvoja verrataan toisiinsa. Paine-ero voidaan myös ilmoittaa jonkin verrokkiarvon (esimerkiksi absoluuttinen ilmanpaine) suhteessa, jolloin paineen mittaaminen voidaan suorittaa vain yhden ilmatilan mittauksella.

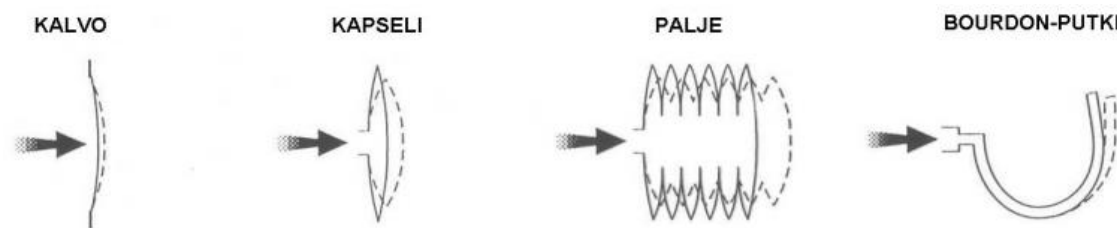
Rakennusfysiikassa paine-eromittauksella pyritään selvittämään rakennuksen ulkovaipan yli oleva paine-ero ulkoilmaan nähden tai vaihtoehtoisesti rakennuksen sisätilojen välillä vallitsevia paine-eroja. Paine-eromittauksilla saadaan selville rakenteiden läpi tai rakenteiden liittymäkohdista virtaavien ilmavirtojen suunta. Rakennuksen paine-eroja mitattaessa on huomioitava, että rakennuksen vaipan yli oleva paine-ero vaihtelee rakennuksen korkeussuunnassa. Muita mittauksessa huomioon otettavia seikkoja ovat ulko- ja sisälämpötilat, tuulen suunta ja nopeus sekä ilmanvaihto. Ilmanvaihdon osalta paine-eroihin vaikuttaa suurelta osin tulo- ja poistoilmavirtojen välinen suhde.

Paine-eroja rakennuksissa mitataan asentamalla mittalaite rakennuksen sisälle ja viemällä mittalaitteen mittaputki rakennuksen vaipan läpi ulkoilmatilaan. Usein ulos tuleva mittaputki asennetaan ikkuna- tai oviaukon tiivisteiden tai karmin ja rungon väliseen tilaan. Mittalaitteessa itsessään on sisäilman painetta mittaava, erillinen mittaputki. Näiden kahden mittaputken kautta kulkevan ilman paineiden välille syntyy eroja, jotka mittalaite rekisteröi.

Paine-eroja (tai painetta) mittaavia laitteita on monia erilaisia. Yleensä rakennusfysikaalisia mittauksia suorittaessa käytetään mekaaniseen muodonmuutokseen perustuvia mittalaitteita. Mekaanisiin muodonmuutoksiin perustuvissa mittalaitteissa paine vaikuttaa laitteen tuntopäähän siten, että se liikkuu. Toimivan ja käyttökelpoisen mittalaitteen tulee olla sellainen, että liike (eli muodonmuutos) on riittävän pieni, jotta se pysyy materiaalin ominaisuuksien puitteissa elastisella alueella. Toisaalta muutoksen tulee olla riittävän suuri, jotta se voidaan havaita riittävällä tavalla. Edellä mainituista syistä johtuen matalille paineille käytetään ohuita, joustavia komponentteja. Jäykempiä ja paksumpia komponentteja käytetään korkeampien paineiden mittalaitteissa.

Kuvasta 3.1 nähdään, että mittalaitteen tuntopäässä aiheutuvan muutoksen eli siirtymän havaitsemiseksi käytössä on useita erilaisia tekniikoita mittalaitteen tyypistä riippuen: paineesta johtuvan muodonmuutoksen muuntamiseksi paineeksi voidaan käyttää sähköistä tai mekaanista vahvistusta tai hyödyntää vastuksen, kapasitanssin, värähtelytaajuuden tai muun vastaavan tekijän riippuvuutta muodonmuutoksesta. Kaasujen ominaisuuks-

siin perustuvia epäsuoria menetelmiä käytetään hyvin pienten absoluuttipaineiden mittaamisessa, joissa paineen aiheuttamat muodonmuutokset ovat muuten liian pieniä havaittavaksi.



**Kuva 3.1** Paine aiheuttaa muutoksen mittarin tuntopäähän (Saxholm & Rantanen, 2011).

COMBI- hankkeen paine-eromittausten tarkempi kuvaus on tämän työn luvussa 4.

### 3.2 Lämpötilan mittaaminen

Aineen tai kappaleen lämpötilan mittaaminen perustuu joko kosketusmittaukseen (lasiputkilämpömittarit, vastuslämpömittarit ja termoelementit) tai koskemattomaan mittaukseen (infrapunalämpömittarit) (Weckström, 2005). Kosketusmittauksen edellytyksenä on, että lämpömittari on upotettu riittävän syvälle mitattavaan väliaineeseen. Mikäli väliaineena on kiinteä kappale, tulisi lämpömittarille olla riittävän syvä tasku tai onkalo. Pintalämpömittareita ei yleensä upoteta taskuihin, mikä saattaa johtaa virheellisiin mittaus tuloksiin johtuen pintalämpömittarin huonosta kosketuksesta mitattavaan kappaleeseen.

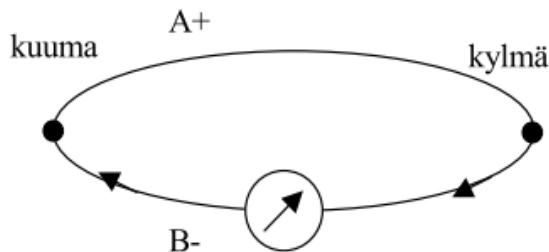
Lämpötilan mittaaminen on usein hidas toimenpide. Mittarin asennuksen jälkeen tulee mittalaitteen lämpötilan tasaantua mittauskohteen lämpötilaan ennen mittauksen aloitusta. Digitaalinäytöllä varustetulla vastusanturilla mitattaessa tulee huomioida, että mittausvirta lämmittää anturia.

Kuten kaikessa mittaamisessa, myös lämpötilan mittaamisessa aiheutuu virhettä. Lämpötilan mittaus tulee suorittaa useita kertoja, jolloin itse mittaus tulos on saatujen tulosten keskiarvo. Näin saatu tulos korjataan mittarin kalibrointitodistuksen mukaisella arvolla. Mikäli halutaan tehdä pitkäaikaista lämpötilan mittausta olosuhdemittauksena, usein riittävä ja hyväksyttävä taso on kalibroidulla mittalaitteella suoritettu suora (korjaamaton mittaus tulos) mittaus, jonka tulokset kirjataan sinällään ylös.

Lämpötilaa voidaan mitata useilla erilaisilla mittareilla. Lasiputkilämpömittareiden toiminta perustuu lasisen nestesäiliön ja kapillaariputken sisällä olevan nesteen lämpölaajenemiseen. Lasiputkilämpömittareiden nesteinä käytetään yleensä elohopeaa tai spriitä. Elohopean käyttö mittalaitteissa on kuitenkin käytännössä lopetettu, koska elohopea saastuttaa ympäristöä. Vanhaa elohopealämpömittaria ei voi käyttää elohopean jähmettymislämpötilaa  $-38,8\text{ °C}$  alaisemmissa lämpötiloissa, mutta mikäli elohopeaan on sekoitettu talliumia, voidaan päästä lämpötilaan  $-50\text{ °C}$ . Elohopeamittarin maksimilämpötila voi

olla jopa  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mutta tällaisen mittarin kalibrointi ja käyttö on käytännössä hankalaa (Weckström, 2005). Näin korkean lämpötilan mittaamiseen soveltuu paremmin esimerkiksi termoelementti. Spriiällä täytetty lasiputkilämpömittari soveltuu lämpötila-alueelle  $-80\dots+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lasiputkilämpömittarin asteikon askelarvo (eli jakoväli) on yleensä välillä  $0,001\dots 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Weckström, 2005).

Kun kahdesta eri sähköä johtavasta materiaalista valmistettua lankaa yhdistetään kuvan 3.2 mukaisesti virtapiiriksi, syntyy lankojen välille termopari. Tätä niin sanottua termojännitettä käytetään hyväksi termosähköistä ilmiötä hyväksikäyttävässä lämpömittarissa, termoelementissä. Termoelementti soveltuu yksinkertaisuutensa, luotettavuutensa ja halvan hinnan takia vastusantureita paremmin korkeiden ( $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) lämpötilojen mittaamiseen. Termoelementtiä käytettäessä lämpömittarina on huomioitava, että mitattu termojännite riippuu mittaushetken (kuuma) ja vertailupisteen (kylmä) lämpötiloista. Tämän takia mitattavan kohteen lämpötilan määrittämiseksi on termojännitteen lisäksi tunnettava vertailupisteen lämpötila.



**Kuva 3.2** Termojännitteen syntyminen. Kuvassa on virtapiiriin kytketty galvanometri, joka on analoginen virtamittari. Galvanometrin lukema kasvaa liitoskohtien lämpötila-eron kasvaessa (Weckström, 2005).

Vastuslämpömittariksi kutsutaan laitetta, jonka anturiaineen sähköinen vastusarvo riippuu lämpötilasta. Parhaita vastusantureita ovat lähinnä metalliset johteet ja metalliseokset sekä tietyt puolijohteet (Weckström, 2005). Tavallisimmin käytetyt anturit valmistetaan kuparista, platinasta, nikkelistä tai metallioksidien seoksista (termistorit). Platinavastusanturit voidaan jakaa kahteen ryhmään: lanka-anturi (langan paksuus  $0,05\text{ mm}$ ) ja platinakalvoanturi. Yleisimmin käytetty standardisoitu resistanssiarvo  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa on  $R_0 = 100\text{ }\Omega$  (Pt100-anturi). Seuraavassa kuvassa on esimerkki platinavastusanturista.



**Kuva 3.3** Tarkkuusluokan A ( $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) Pt100-anturi lämpötila-alueelle  $-75\dots 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kuvassa lisäksi teflon-kaapeli (Nokeval, internetsivut, 2016).

Infrapunalämpömittarien toiminta perustuu kohteen pinnasta säteilevän energian mittaamiseen. Lämpösäteilyn mittaaminen eli pyrometria tapahtuu kohdetta koskettamatta. Säteilystä perustuvan mittaustekniikan etuja vastusantureihin, termistoreihin ja termoelementteihin nähden on kohteiden lämpötilojen mittaaminen, joita on hankala tai mahdoton mitata perinteisillä kosketusmittauksilla. Tällaisia mittauksia ovat esimerkiksi erittäin korkeat lämpötilat, liikkuvat kohteet, räjähdysvaaralliset kohteet, etäällä olevat kohteet sekä nopeasti muuttuvat lämpötilat. Kaupallisesti valmistetuilla pyrometreillä lämpötilan mittausalue on  $-50 \dots 3000 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (Weckström, 2005). Esimerkki tällaisesta mittalaitteesta on esitetty kuvassa 3.4. Lämpökamerat ovat pyrometrien erikoistapauksia, joilla joissain tapauksissa mittaus voidaan suorittaa jopa kahden kilometrin päästä. Luotettavien mittaus tulosten saavuttamiseksi vaaditaan hyvää ymmärrystä mitattavan kohteen ominaisuuksista sekä säteilypyrometrien toiminnasta. Ulkoisten säteilylähteiden (esimerkiksi aurionvalo) huomioon ottamatta jättäminen voi johtaa hyvinkin suuriin virheisiin mittaustuloksissa.



**Kuva 3.4** Lämpötila-alueelle  $550 \dots 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  tai  $1000 \dots 3200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (riippuu mallista) tarkoitettu optinen infrapunapyrometri (Sintrol, internetsivut, 2016).

Puhekielessä usein mainitut laserpintalämpömittarit ovat käsikäyttöisiä infrapunapyrometrejä. Laitteiden laserpisteen tarkoituksena on vain auttaa käyttäjää kohdentamaan mittalaite haluttuun pisteeseen, eikä laserpisteellä ole itse mittaustekniikan kanssa mitään tekemistä.

COMBI-hankkeessa sisätilan lämpötiloja mitataan loggaavilla laitteilla Rotronic CL11 ja Comark N2003. Laitteista CL11 on verkkovirtaan kytkettävä yhdistelmälaite (myös suhteellisen kosteuden ja hiilidioksidin mittaus) ja N2003 on paristokäyttöinen yhdistelmälaite (myös suhteellinen kosteus). Molempien laitteiden loggausväliksi on asetettu yksi tunti ja ne tulee lukea paikan päällä erillisellä telakointiasemalla. Rotronic- ja Comark-mittalaitteiden sijainnit case-kohteissa ovat esitetty liitteessä 3.

Tässä työssä ei esitetä case-kohteiden lämpötilamittausten tuloksia.

### 3.3 Hiilidioksidin mittaaminen

Yleisimmin hiilidioksidin mittaaminen rakennusfysikaalisissa sovelluksissa perustuu infrapuna-anturitekniikkaan. Infrapuna-anturit eli NDIR-anturit (non dispersive infrared) ovat erittäin herkkiä, selektiivisiä ja stabiileita. Ne ovat pitkäikäisiä ja kestävät hyvin ympäristön muutoksia.

Hiilidioksidilla on ominainen absorptiojuova infrapuna-alueella aallonpituuden ollessa  $4,26\text{ }\mu\text{m}$ . Kun infrapunasäteily läpäisee hiilidioksidia sisältävää kaasua, kaasun hiilidioksidimolekyylit absorboivat osan säteilystä. Kaasun läpäisevän säteilyn määrä riippuu kaasun hiilidioksidipitoisuudesta. Ilmiön määrittämiseen käytetään infrapuna-anturia, joka koostuu infrapunalähteestä, detektorista sekä optisesta polusta, kuten on esitetty kuvassa 3.5.



**Kuva 3.5** Hiilidioksidimolekyylien absorboima infrapunasäteily voidaan havaita infrapunadetektorilla,  $A =$  infrapunalähde,  $B =$  optinen polku,  $C =$  detektori (Vaisala, internetsivut, 2016).

Hiilidioksidiantureita on erilaisia ja niillä on eritasoinen suorituskyky. Yhden säteen ja yhden aallonpituuden anturit koostuvat ainoastaan infrapunalähteestä, mittauskammioista sekä detektorista. Tällaisessa anturissa haasteena on sen merkittävä mittaustuloksen ryömintä pitkällä aikavälillä. Hiilidioksidiantureissa käytetään tyypillisesti infrapunalähteenä pienikokoista hehkulamppua, jonka intensiteetti vaihtelee ajan myötä. Tämän lisäksi anturin pinnoille voi kerääntyä pölyä ja likaa. Anturi tulkitsee tällaiset muutokset virheellisesti hiilidioksidipitoisuuden muutoksiksi, mikä vääristää mittaustulosta.

Joidenkin antureiden valmistajat pyrkivät kompensoimaan tekniikalle ominaista epästabiilisuutta automaattisella taustakalibroinnilla (esimerkiksi COMBI-hankkeessa käytettävät Rotronic CL11-laitteet). Tällöin anturi tallentaa tietyn ajanjakson (tyypillisesti useita päiviä) alimman hiilidioksidilukeman, jonka jälkeen laite skaalaa kaikkia lukemia sillä oletuksella, että alin lukema vastaa raikasta ulkoilmaa (hiilidioksidipitoisuus  $400\text{ ppm}$ ). Tämä ei kuitenkaan aina vastaa todellista tilannetta, sillä useiden rakennusten käytöstä johtuen rakennuksen alin hiilidioksiditaso voi olla huomattavasti korkeampi (esimerkiksi sairaalat, joissa on aina ihmisiä paikalla). Tällainen virheellisesti tulkittu hiilidioksidin pohjataso voi johtaa ilmanvaihdon vääränlaiseen suunnitteluun ja säätöön.

COMBI-hankkeessa hiilidioksidin mittaus suoritetaan Rotronic CL11- yhdistelmämittarilla. Mittalaitteiden sijoitus on esitetty liitteessä 3.

Tässä työssä ei esitetä case-kohteiden hiilidioksidimittausten tuloksia.

### 3.4 Suhteellisen kosteuden mittaaminen

Ilman ja materiaalien suhteellisen kosteuden mittaukseen on olemassa monia erilaisia laitteita. Asuinhuoneiden perinteiset seinällä olevat kosteusmittarit ovat niin sanottuja hiushygrometrejä, joissa mittalaitteen viisarin liike perustuu hiuksen muodonmuutokseen kosteuden vaikutuksesta. Mekaanisessa hiushygrometrissä mittaustulos piirtyy paperille, mikä on vaihdettava mittausjakson jälkeen. Laitetyypin mukaan mittausjakso on vuorokaudesta kuukauteen, minkä jälkeen koneisto on vedettävä. Hiushygrometri soveltuu ilman suhteellisen kosteuden seurantaan ja esimerkiksi kuivumisolosuhteiden seurantaan. Laitteen etuna on sen yksinkertaisuus ja edullinen hinta. Sen mittausalue on kuitenkin kapea (noin 20...70 % RH) ja laite on usein epästabiili. Sillä ei myöskään voi suorittaa materiaalien suhteellisen kosteuden mittauksia.

Nykyiset suhteellisen kosteuden mittaukset perustuvat sähköisten mittalaitteiden käyttöön. Laitteet koostuvat yleensä mitta-anturista ja näyttölaitteesta. Anturityyppejä on useita: kapasitiiviset mittausanturit, elektrolyytin sähkönjohtavuuteen perustuvat anturit, kastepisteanturit. Nykyisin anturit ovat usein myös kytkettynä jonkinlaiseen tiedonkeruulaitteeseen (loggeri), mikä tallentaa saadut mittaustulokset halutulla aikavälillä ja/tai mittausajanjaksolla. Tällöin puhutaan niin sanotusta loggaavasta mittarista.

Kapasitiiviset mittausanturit ovat yleisimpiä rakenteiden ja rakennusten kosteusmittauksissa käytettävistä mittalaitteista. Kosteusanturi koostuu kahdesta elektrodista ja niiden väliin sijoitetusta vesimolekyyleille herkästä materiaalista (muovi, polymeeri). Materiaali sitoo kosteutta ympäröivästä ilmasta, mikä aiheuttaa kapasitanssin muutoksen. Tämän jälkeen kosteuden mukana tapahtuvat muutokset johdetaan laitteen näytölle. Kapasitiiviset anturit ovat herkkiä ja niillä on laaja mittausalue. Lisäksi ne ovat suhteellisen stabiileja.

Resistiivisten antureiden toiminta perustuu vastuksen muuttumisen mittaamiseen. Jalo-metallinen (kulta, ruteniumoksidi) liuska taivutetaan tai ”tulostetaan” sekä pasutetaan kamman muotoon, jolloin siitä muodostuu elektrodi. Tämän jälkeen elektrodin päälle asennetaan polymeerikalvo, mikä toimii kosteuden havainnoivana kalvona johtuen siirrettävissä olevien ionien läsnäolosta. Ioneista johtuen systeemissä tapahtuu impedanssin muutoksia, jotka tulkitaan mittaustuloksiksi.

Kuten kaikessa mittaamisessa, myös suhteellisen kosteuden mittaamisessa esiintyy virhettä ja mittauksen epävarmuutta. Laitteiden valmistajat antavat tuotteilleen kalibrointitodistuksen. Lisäksi laitevalmistaja ilmoittaa mittarin tarkkuuden ja resoluution. Suhteellisen kosteuden mittareilla tarkkuus ilmoitetaan usein prosenttilukuna (esimerkiksi  $< \pm 2$  % RH), mikä ilmaisee virhemarginaalia saadun suhteellisen kosteuden tuloksessa.

COMBI-hankkeessa sisäilman suhteellista kosteutta mitataan ja logataan Rotronic CL11- ja Comark N2003- mittareilla. Mittareiden sijainnit case-kohteissa on esitetty liitteessä 3.

Tässä työssä ei esitetä case-kohteiden suhteellisen kosteuden mittaustuloksia.

### 3.5 Radonin mittaaminen

Radonia ei voi havaita aistinvaraisesti, joten sen pitoisuudet tulee mitata. Yleisimmin tämä tapahtuu radonmittauspurkeilla, jotka ovat noin jääkiekon kokoisia mustia kiekkoja kuvan 3.6 esimerkin mukaisesti. Radonpurkkeja voi tilata esimerkiksi Säteilyturvakeskukselta.

Radonpurkin toiminta perustuu sen sisällä olevaan polykarbonaattikalvoon. Radonkaasun tunkeuduttua purkkiin, jättää se purkin sisällä olevaan polykarbonaattikalvoon jälkiä, jotka saadaan näkyviin laboratoriokäsittelyllä. Radonmittauspurkki on kumulatiivinen mittausväline. Purkki toimii siis pitkäaikaisessa mittauksessa radonin kokonaismäärän havainnointivälineenä. Sillä ei saada selville tietyn ajanhetken (esimerkiksi yksi tunti) ilman radonpitoisuutta, vaan radonmittauspurkki toimii paitsi yleisen radonmäärän mittarina myös indikaattorina mahdollisille dynaamisille radonmittauksille.



**Kuva 3.6** Säteilyturvakeskuksen hyväksymä radonmittauspurkki (Radontalkoot.fi, internetsivut, 2016).

COMBI-hankkeessa radonmittauksia tullaan tekemään kaikissa case-kohteissa. Mittauspurkkien määrinä pyritään käyttämään Säteilyturvakeskuksen ohjeistusta 1 purkki/200 m<sup>2</sup> tai vähintään 2 purkkia/kohde. Purkit asennetaan rakennuksen alimman kerroksen (mukaan lukien kellarit) ilmatilaan mahdollisuuksien mukaan katseelta suojaisaan paikkaan. Radonmittauspurkkien ja kohteiden painesuhteiden mukaan kartoitetaan mahdolliset kriittiset case-kohteet ja mittauspisteet, joissa tullaan tekemään dynaamisia radonmittauksia. Dynaamisella radonmittauksella pyritään selvittämään lyhyen aikavälin radonpitoisuuksien vaihtelua kohteessa. Dynaaminen mittaus voidaan suorittaa esimerkiksi Säteilyturvakeskukselta vuokrattavalla AlphaGUARD- merkkisellä ammattitason radonmittarilla.

Tässä työssä ei esitetä case-kohteiden radonmittausten tuloksia.



## 4. PAINE-EROJEN MITTAAMINEN CASE-KOHTEISSA

### 4.1 Yleistä

Rakennusten sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa mitattiin Helsingin ja Pirkanmaan alueiden kouluissa ja päiväkodeissa. Mitattavien kohteiden kuvaukset on esitetty kohdissa 5.2 ja 5.3. Mittaukset suoritettiin etäluettavia paine-erolähtettäviä hyväksi käyttäen. Paine-erolähtettimien ja varusteiden kuvaukset on esitetty kohdassa 4.2.

Paine-eromittausten tarkoituksena oli selvittää rakennusten käytön aikaiset sisäilman painesuhteet ulkoilmaan nähden rakennuksen tavanomaisen käytön aikana. Tämän lisäksi arvioitiin muita sisäilman laatuun vaikuttavia parametreja (lämpötila, sisä-/ulkoilman suhteellinen kosteus sekä hiilidioksidi- ja radonpitoisuus) ja niiden korrelointia paine-eroihin. Mittausten aloitusajankohta sijoittui vuoden 2016 syksyyn elokuulle. Mittauksen kokonaiskesto tätä työtä tehdessä ei ollut vielä täysin selvillä, mutta vähimmäisaika mittauksille on kuitenkin yksi vuosi.

### 4.2 Paine-erolähtettimien ja varusteiden valinta

Antureiden valintojen ja vertailun lähtökohta oli etsiä tutkimukseen soveltuvia paine-erolähtettäviä internetistä. Valintakriteerejä ei alkuvaiheessa rajattu kattamaan vain tiettyä lähetintyyppiä, vaan vertailuantureiksi valikoitui digitaalisten PC-lähtettimien lisäksi myös jännite- ja sähkövirtalähtettäviä. Lähtettimien vertailusta ja valinnasta on kerrottu tarkemmin tämän työn kohdassa 4.2.2. Mittausyksiköiden muiden varusteiden valintaa ohjasi valittu lähetintyyppi. Lähetintyyppi määritteli käytettävien komponenttien määrän ja laadun. Tämän lisäksi muut liitettävät osat, kuten paineputket, virtalähteet ja kiinnikealustat määräytyivät valitun lähtettimen mukaan.

Vertailuun mukaan otettavat paine-erolähtettimet valittiin seuraava taulukon mukaisesti.

**Taulukko 4.1** Paine-erolähtettimien alustava taulukointi.

VALMISTAJA	MALLI	TARKKUUS	MITTAUS- ALUE
Micatrone/Kokko Control	MF-PD (jännite/sähkövirta)	$\pm 0,5$ % mit- tausalueesta + $\pm 0,5$ Pa	$\pm 50$ Pa
Produal	PEL-sarja (jännite/sähkövirta)	$\pm 0,5$ Pa $\pm 1$ %	$\pm 50/100$ Pa

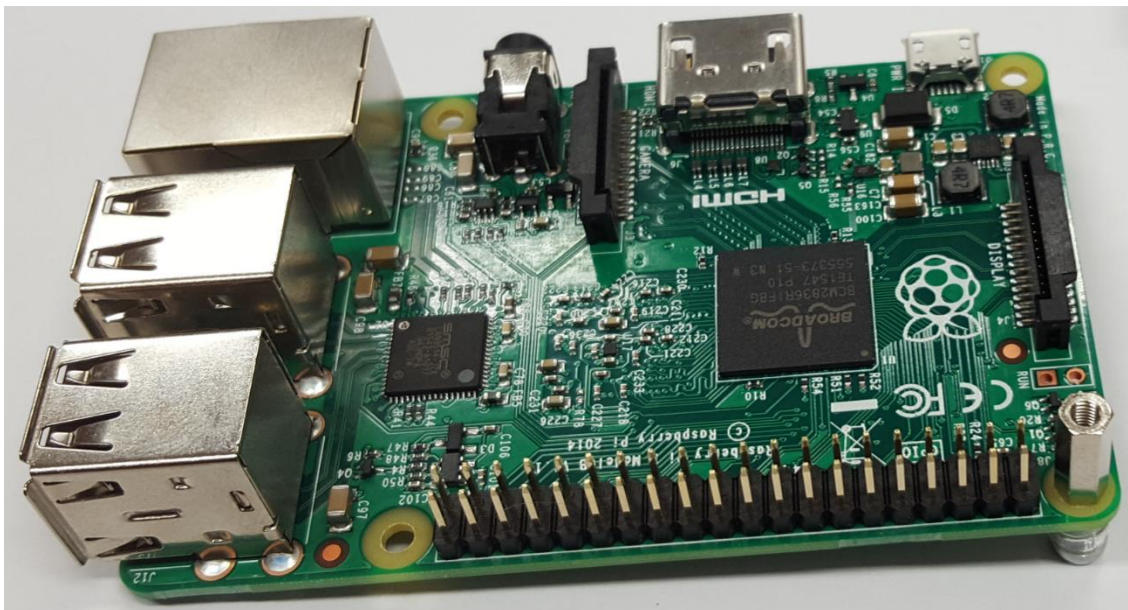
Huba Control/Wexon	DTA-010 (jännite/sähkövirta)	$\pm 1 \%$	$\pm 100 \text{ Pa}$
Teknocalor	PU/PI/PIZ (jännite/sähkövirta)	1 % alueelle $\pm 50 \dots \pm 100 \text{ Pa}$	$\pm 50/100 \text{ Pa}$
Beck/Stig Wahlström Oy	984A (3-wire) (jännite/sähkövirta)	pitkäkestoinen: $\leq \pm 0,5 \%$ ... $\pm 2,5 \%$ /vuosi	$\pm 50/100 \text{ Pa}$
Vaisala	PDT101 (jännite/sähkövirta)	0,4 %	$\pm 60 \text{ Pa}$
ZnDiy-BRY	MS5611 (barometrinen) (I <sup>2</sup> C)	$\pm 1,5 \text{ mbar}$	10~1200 mbar
Adafruit	BMP180 (barometri- nen) (I <sup>2</sup> C)	0,03 hPa	300-1100 hPa
Sensiron	SDP600 (I <sup>2</sup> C)	3 % lukemasta +0,5 % toisto	up to $\pm 500 \text{ Pa}$
Honeywell	HSCDRRN001ND2A3 (I <sup>2</sup> C)	$\pm 0,25 \%$	$\pm 60 \text{ Pa}$
Tinytag/Stig Wahlström Oy	TGPR-0704 (jännite) dataloggeri, 64000 luke- maa	$\pm 1 \%$	$\pm 100 \text{ Pa}$

#### 4.2.1 Raspberry Pi

Mittausyksikön GSM-modeemi (mökkula) ja paine-erolähetin tarvitsivat liitos- ja tiedon-siirtoalustan. Alustaksi valittiin yhden piirilevyn pienoistietokone Raspberry Pi 2 model B, johon paine-erolähetin liitettiin erillisellä piirisarjalla. Raspberry Pi soveltui komponentiksi hyvin sen alhaisen hinnan ja luotettavan maineensa ansiosta. Tämän lisäksi erillistä ulostulosignaalin muunninta ei tarvittu, johtuen Raspberryn I<sup>2</sup>C ulostulosignaali-  
list. Raspberry Pi:n keskeisimpiä ominaisuuksia ovat (Raspberry Pi Foundation, 2016):

- 900 MHz moniydinprosessori, ARM Cortex-A7 CPU
- Muisti 1 Gt RAM (jaettu näytönohjaimen kanssa)
- 4 kappaletta USB-portteja
- Full HDMI- portti
- Ethernet- portti
- Micro SD- korttipaikka

Johtuen Raspberry Pi:n ARMv7- prosessorista sen käyttöjärjestelmänä voidaan ajaa Li-nux- ja Microsoft Windows 10- käyttöympäristöjä (Raspberry Pi Foundation, 2016).



**Kuva 4.1** Raspberry Pi 2 model B- minitietokone (kuvassa myös paine-eroanturi ja liitospiirilevy).

Raspberryn rinnalla vertailuun otettiin Arduinon vastaava piirilevytuote. Tuote ei kuitenkaan tullut valituksi johtuen analogisesta ulostulosignaalista.

#### 4.2.2 Vaatimukset antureille ja varusteille

Käytännön syistä johtuen paine-erolähettimien keräämän datan tallennus ja luettelointi tuli tehdä mahdolliseksi etänä. Toisin sanoen paine-eroista saatava data tuli olla mahdollista kerätä langattomasti internetin välityksellä, jolloin välttyttäisiin liioilta kohdekäynteiltä ja kerätty data saataisiin tutkimuskäyttöön riippumatta erilaisista muuttujista, kuten kohteen käyttäjien aikatauluista. Tämän lisäksi Helsingin ja Tampereen kaupunkien Tilakeskukset eivät antaneet lupaa laitteiston liittämiseen rakennusten kiinteään, sisäiseen verkkoon johtuen mahdollisista internetin välityksellä tapahtuvista turvallisuusuhkista.

Etäluettavien lähettimien toinen keskeinen hyöty on yksittäisiin ongelmatapauksiin reagoiminen. Datatiedon etäluke mahdollistaa mittayksiköiden toiminnan arvioimisen ja ongelmatapauksiin reagoimisen yksilöidysti ja nopealla aikataululla, jolloin minimoidaan mittaussyksiköiden mittaustoiminnan keskeytyminen tai heikkolaatuisuus.

Yksi keskeinen arviointiperuste paine-erolähettimen valinnalle oli yksikköhinta. Mittauskohteiden kartoituksen perusteella voitiin arvioida tarvittavien mittaussyksiköiden määrän olevan noin 120 kappaletta. Mittaussyksikön kokonaishintaan vaikuttaa lisäksi myös lähettimeen liitettävien komponenttien asennusten helppous ja yksinkertaisuus. Tämä tuki PC- lähettimen valintaa paitsi alhaisen hinnan myös mittausdatan käsittelyn helppouden takia. Digitaalisen paine-erodatan lähettäminen suoraan anturilta poistaa jännite- tai sähkövirtaviestin muuttamisen tarpeen erillisellä komponentilla, jolloin mittaussyksikön kokonaishinta jää alhaisemmaksi.

Maltillisen hinnan lisäksi paine-erolähettimeltä vaadittiin riittävää mittaustarkkuutta. Jo hyvin pienet paine-erot rakennuksessa aiheuttavat ilman konvektiota, joten tutkimusryhmän kokouksessa päätettiin, että lähettimien mittausrvirheen tulisi olla  $\leq 3$  Pa koko mitta-alueella. Tämä tarkoitti sitä, että lähetinvalmistajien antamilla tarkkuusarvoilla laskettiin mittausrvirheet koko mitta-alueelle, joita voitiin vertailla.

Mittausyksikön varusteista kotelointi ja paineputkisto ovat keskeisessä asemassa. Koteloinnilla osaltaan estetään ilkivaltaa ja toisaalta varmistetaan komponenttien paikallaan pysyminen, joka taas puolestaan estää laitteiston rikkoutumisen kuljetusten ja asennusten aikana. Kotelointi mahdollistaa myös helpon, kiinteän seinäasennuksen suoraan kotelon pohjan läpi. Rakennuksen ulkoseinän läpi asennettavan paineletkun materiaalin tuli olla riittävän kestävä, jotta letkua taivutettaessa se ei halkeaisi tai murtuisi. Tämän lisäksi letkun tulisi kestää murtumatta pakkasta. Paineletkuiksi valittiin 6/4 PUR- letku ulko-asennuksiin ja 2/1 silikoniletku laitteiston sisäisiin kytkentöihin.

### 4.2.3 Antureiden vertailu

Paine-eroantureiden (lähettimien) vertailussa keskeisiä vaatimuksia olivat pitkän aikavälin tarkkuus, hinta ja ulostulevan viestin laatu ja käsiteltävyys. Antureille suoritettiin alkuvaiheessa käyttökokeet, joilla pyrittiin toteamaan testattavien antureiden toiminta ja yhteensopivuuskyky. Alkuvaiheen käyttökokeissa testattiin Vaisalan, Beckin ja Honeywellin antureita painesäiliökokeella, jonka tuloksista voitiin todeta ennakoitavasti antureiden luotettavuutta sekä ominaisuuksia. Alkuvaiheessa pystyttiin toteamaan joidenkin antureiden olevan toimintaepävarmuutensa ja tarkkuutensa takia soveltumattomia tehtävään sekä tutkimusryhmän vaatimukset täyttävään mittauskäyttöön. Esimerkki tällaisesta epävarmuustekijästä oli tilanne, missä ulostulevan datan saanti osoittautui ongelmalliseksi ja tämän lisäksi anturin tehdaskalibroinnissa ilmeni ongelmia mm. off set- asetuksissa.

Paine-eroanturin valinta pyrittiin keskittämään I<sup>2</sup>C-protokollaa tukevaan lähettimeen, johtuen ulos tulevan digitaalisen datan paremmasta käytettävyydestä. Tiedossa oli, että Honeywellin tarjoamissa antureissa olisi riittävät tarkkuudet ja alhainen hintataso, jolloin ne sopisivat erinomaisesti haluttuun mittauskäyttöön. Tätä silmällä pitäen antureiden vertailumittaukset suoritettiin käyttäen hyväksi yliopiston rakennushallin omaa, kalibroitua tarkkuusmittaria, jolla suoritettiin vertailumittaukset niin Honeywellin, Vaisalan kuin Beck:kin antureihin. Näin saatiin riittävästi referenssejä ja vertailudataa Honeywellin valinnan pohjaksi. Vaisalan PDT101- anturista tehtiin myös referenssianturi johtuen sen luotettavasta maineesta. Vaisalan tarkkuuden tueksi tutkimusryhmällä oli käytettävissään valmistajan antama kalibroitodistus. Tämän lisäksi Vaisalan anturi voitiin olettaa luotettavaksi aikaisempien kokemusten perusteella. Vaisalan anturille tehtiin myös vertailu käyttäen rakennushallin kalibroitua paine-eromittaria Furness FCO-16, joka on kuvattu kuvassa 4.2.



**Kuva 4.2** Furness Control FCO-16- paine-eromittari.

Vaisalan ja Beck:n vertailumittauksen tulokset on esitetty liitteessä 1. Mittaustuloksista voidaan nähdä, että referenssinä toimivan Furnessin mittarin ja Vaisalan paine-eroanturin välinen ero vaihteli välillä  $-0,373 \dots 0,584$  Pa. Mittaustuloksia voitiin siis pitää erinomaisena ja näin ollen Vaisalan paine-eroanturia voitiin käyttää referenssianturina tarkasteltaville antureille. Vaisalan referenssianturin ja alkutarkistukseen mukaan otetun Beck:n anturin välinen ero vaihteli välillä  $-0,132 \dots 2,884$  Pa. Todettiin, että Beck:n antureiden tarkkuus ei ole riittävä. Mittareiden välisten eroavaisuuksien takia kuitenkin otettiin ensimmäiselle kalibrointikierrökselle kaksi Beck:n anturia mukaan. Tätä on kuvattu tarkemmin kohdassa 4.2.4.

#### 4.2.4 Antureiden kalibrointi, viritys ja antureiden valinta

Kalibroimalla määritetään mittauslaitteen näyttämän ja mittanormaalien välinen korrelaatio. Paineanturin kalibroinnissa voidaan määrittää syötetyn paineen ja ulostulosignaalin välinen yhteys. Kalibroinnissa voidaan selvittää laitteen näyttämään liittyvä virhe, joko suoraan näyttölaitteen lukeman perusteella ja/tai ulostulosignaalin perusteella (Saxholm & Rantanen, 2011).

Paine-eromittarin kalibroinnin tarkoituksena on usein laitteen käyttökunnon selvittäminen. Tuloksia verrataan painemittaristandardiin SFS-EN 837-1 tai muuhun vastaavaan, samaa laajuutta ja tarkkuutta edellyttävään spesifikaatioon. Standardien tai muun spesifikaation vaatimukset mittalaitteille koskevat usein maksimivirhettä, hystereesiä ja lineaarisuutta. Käytettävä kalibrointimenetelmä on valittava näiden suhteen asianmukaisesti siten, että tarvittavat ominaisuudet saadaan selville (Saxholm & Rantanen, 2011).

Kalibroinnin tavoitteena on siis määrittää mittarin näyttämiin käytön aikana tehtävien korjausten suuruudet tai selvittää, että voidaanko mittaria käyttää sellaisenaan vai onko sitä viritettävä. Tavoitteet mittarille voivat olla osin päällekkäisiäkin. Joka tapauksessa keskeinen ja ratkaiseva tekijä on mittarin virhe, joka määritetään seuraavasti (Saxholm & Rantanen, 2011):

Mittarin virhe = mittarin näyttämä paine – mittanormaanin paine

Laskettujen virhearvojen avulla korjataan mittarin näyttämiä käytön aikana. Lasketussa virheessä on aina epävarmuutta (Saxholm & Rantanen, 2011).

Mittauslaitteen virhettä selvitetään siis kalibroimalla eli kalibrointi kertoo, kuinka paljon laite näyttää väärin. Tätä tietoa käytetään esimerkiksi laitteen käyttökunnon ja tarvittavien korjausten suuruuden selvittämiseen (korjaus on virheen vastaluku). Mittauslaitetta voidaan virittää kalibroimalla se olemassa olevien tietojen perusteella. Viritys on kalibrointia seuraava, erillinen toimenpide (Saxholm & Rantanen, 2011). Tässä työssä tuota viritystä kuitenkin kutsutaan kalibroitikierrokseksi. Edellä mainitut kalibroititoimet liittyvät mittalaitteen valmistajan suorittamaan tehdaskalibrointiin.

Kalibroinnin toteutuksessa kalibroitava painemittari ja mittanormaali (referenssi) kytetään samaan paineverkkoon, ja kalibroitavan laitteen näyttämää vertaillaan mittanormaanin näyttämään erisuuruksilla nimellispaineilla (dynaaminen kuormitus) (Saxholm & Rantanen, 2011).

Varsinaisille antureiden kalibroitikierroksille valittiin kaksi Beck:n ja kaksi Vaisalan anturia, joiden tuloksia vertailtiin Vaisalan referenssianturia vastaan. Ensimmäisen kierroksen kalibroinnilla pyrittiin selvittämään Vaisalan ja Beck:n antureiden soveltuvuutta mittauksiin siinä tapauksessa, että Honeywellin antureiden soveltuvuudessa ilmenisi ongelmia.

Antureiden kalibrointi tehtiin käyttäen hyväksi ruuvisäätöistä painesäiliötä (Additel Low pressure test pump 901, -6~6 psi), jolla voitiin säätää järjestelmään tulevaa ja lähtevää painetta portaattomasti (dynaaminen kalibrointi).





**Kuva 4.3** Säädettävä painesäiliö (Additel).

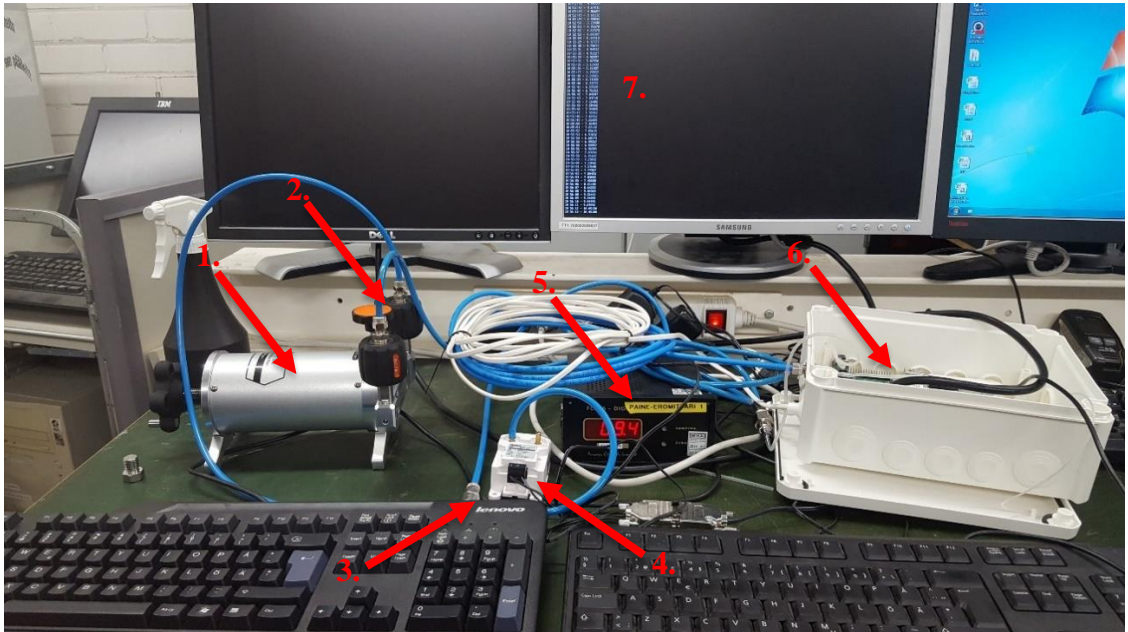
Varsinaisella ensimmäisellä kalibrointikierroksella antureiden off set- säädöt tarkistettiin. Antureiden alkutarkistuksessa ilmeni, että tehdasasetetuissa off set- säädöissä ja niiden muuttamisessa ilmeni ongelmia vertailtaessa kahden saman valmistajan antureita. Liitteessä 2 on esitetty ensimmäisen kalibrointikierroksen tulokset. Tuloksista voidaan tehdä seuraavat keskeisimmät päätelmät:

- Beck:n antureiden off set- säädöt eivät ole tarpeeksi tarkalla tasolla toisiinsa nähden.
- Molempien anturityyppien (Vaisala, Beck) mittaustulosten erot saatiin noin 2 Pa vaihteluvälin sisälle.
- Molempien anturityyppien mittausten toistettavuudessa lyhyellä aikavälillä ei ilmennyt ongelmia.

Toisessa kalibrointikierroksessa keskityttiin Honeywellin antureihin. Laboratoriokalibroinnilla pyrittiin eliminoimaan komponenttikohtaisia vaihteluita ja varmistumaan mittaussyksikön yksikkökohtaisesta tarkkuudesta. Tämä siitäkin huolimatta, että valmistaja toimitti anturit tehdaskalibroituina. Kalibrointiin otettiin mukaan kaksi anturia, joiden tuloksia verrattiin referenssinä toimivaan Vaisalan anturiin. Kalibroinnin tulokset ovat nähtävissä liitteessä 2. Tuloksien keskeisimmät päätelmät olivat:

- Antureiden off set vaihtelee välillä 0,339...0,729 Pa, joita voidaan pitää tarkoituksenmukaisina.
- Vertailumittaukset vastaavat riittävän laajasti ja riittävällä tarkkuudella referenssianturin tuloksia.
- Vertailupaine-erot vaihtelivat välillä -1,58...1,65 Pa ja -1,88...0,81 Pa.
- Vertailupaineet noudattavat riittävällä tarkkuudella lineaarisesti dynaamista kuormitusta, jolloin pitkän aikavälin mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina.
- Honeywellin kalibroinnit voidaan suorittaa luotettavasti koko anturisarjalle.

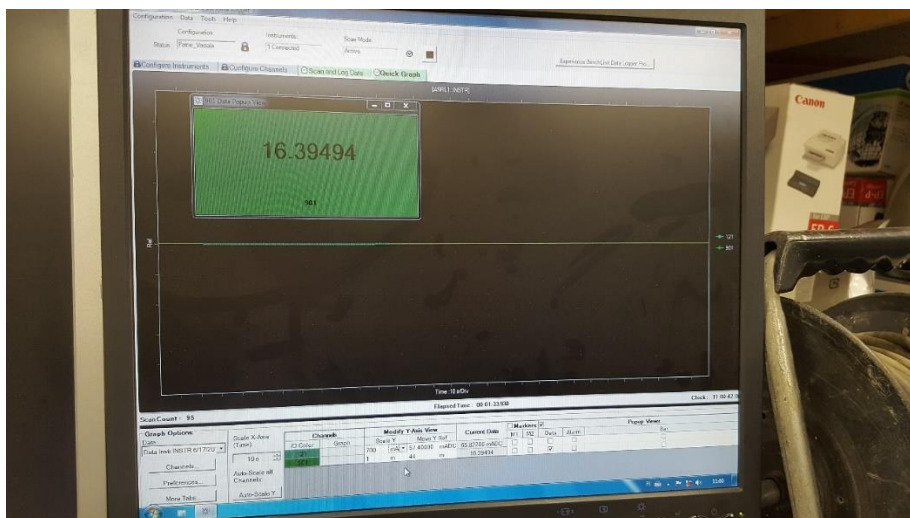
Kalibrointiaseman kokoonpano on esitetty kuvassa 24.



**Kuva 4.4** Kalibrointiaseman kokoonpano: 1. dynaamisesti säädettävä painesäiliö., 2. paineletkujen tulo- ja lähtöliitokset sekä säätöruuvi., 3. paineletkujen T-liitin., 4. Vaisalan referenssianturi., 5. kalibroitu tarkkuusmittari., 6. kalibroitava mittausyksikkö (ks. kohta 4.2.5)., 7. Näyttö (dynaamisen kalibroinnin mittaustulokset).

Kalibrointijärjestelyssä painesäiliöstä tuotiin T-liittimen kautta paineletkut Vaisalan referenssianturiin ja kalibroituun Furnessin mittariin sekä kalibroitavan mittausyksikön anturiin (Honeywell). Vaisalan mittaustuloksia verrattiin tietokoneen näytöllä Furnessin

mittarin tuloksiin. Toisella näytöllä oli tarkasteltavissa kalibroitavan anturin tulokset. Näin ollen mittausyksikön anturi voitiin säätää vastaamaan kahden referenssimittarin tuloksia.



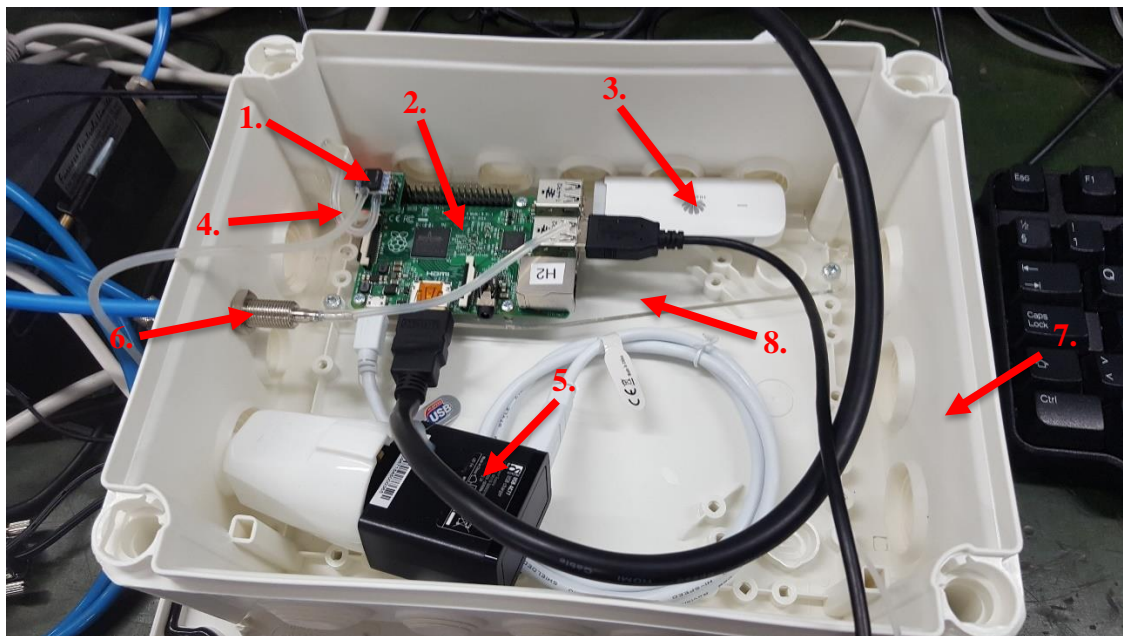
**Kuva 4.5** Kalibrointijärjestelyssä käytetty näyttö, johon tulivat näkyviin Vaisalan anturin mittaustulokset.



Kalibrointi toistettiin kaikille mittausyksiköille. Mittausyksikön kokoonpano ja varusteet on esitetty kohdassa 4.2.5.

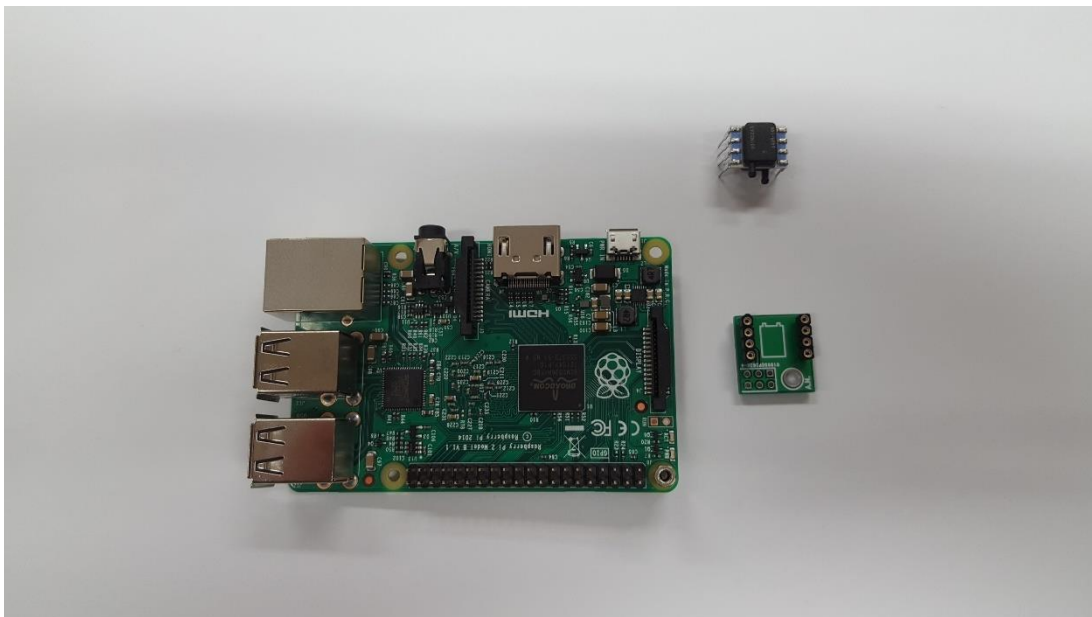
### 4.2.5 Mittausyksikkö

Mittausyksikön kokoonpano on esitetty kuvassa 4.6.



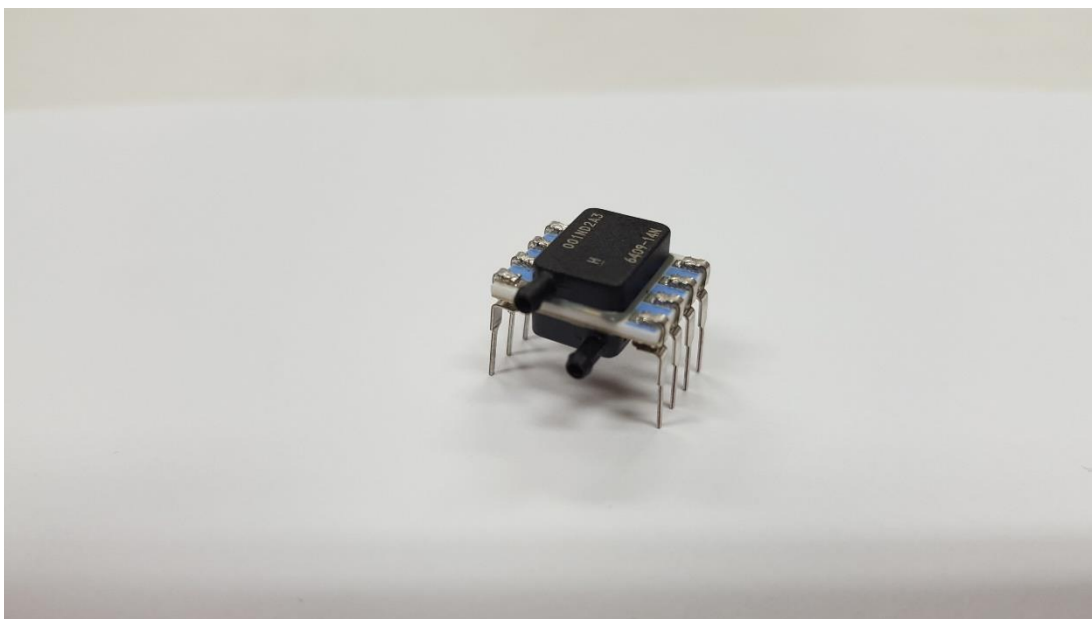
**Kuva 4.6** Mittausyksikkö: 1. paine-eroanturi ja piirilevy (kts. kuva 27)., 2. Raspberry Pi (kts. kuva 21)., 3. GSM-modeemi (mokkula)., 4. paine-eroanturin paineletku., 5. Raspberry Pi:n virtalähde., 6. kiertainen letkun kutistusliitin., 7. mittausyksikön kotelo., 8. kiinnityslevy.

Mittausyksikön muovisen kotelon pohjalle asennettiin muovinen kiinnityslevy, johon Raspberry Pi asennettiin. Raspberry Pi:hin liitettiin paine-eroanturi itse tehdyn piirilevyn välityksellä (esitetty kuvassa 4.7). Raspberry Pi:n virtamuuntajalle tuotiin kotelon valmiin aukon läpi verkkovirtakaapeli, jonka ulkopuolinen pituus jätettiin n. 5 m:n mittaiseksi. Muita kytkentöjä tehtiin ulkoisen paineletkun ja paine-eroanturin letkujen osalta. Ulkoinen paineletku liitettiin silikoniseen sisäletkuun kuristusliittimellä. Paine-eroanturin paineletku vietiin kotelon nurkassa olevaan ruuvitilaan (kannen ruuvi poistettiin tästä nurkasta). Letkun kiinnitys varmistettiin kuumaliimalla. Kotelon ruuvinurkka on avoin molemmista pinnoistaan, joten ilman pääsy paineletkuun ei ole estettynä.



*Kuva 4.7 Raspberry Pi 2, liitospiirilevy ja paine-eroanturi.*

Piirilevyn koko on noin pelikortin kokoinen ja paine-eroanturi on noin sokeripalan kokoinen.



*Kuva 4.8 Paine-eroanturi (Honeywell).*

### 4.3 Mittaustulos ja sen luotettavuus

Olennainen osa kalibrointia ja mittaustulosten jäljitettävyyttä on mittaepävarmuuden laskeminen. Mittaepävarmuus ilmoitetaan aina tulosten yhteydessä. Epävarmuuden laskemisen menetelmät pohjautuvat nykyisin julkaisuun Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). GUM:in uusin versio on vuodelta 2008 (JCGM 100:2008,

GUM 1995 with minor corrections), jossa olevat korjaukset ovat vain vähäisiä alkuperäiseen, vuonna 1993 julkaistuun teokseen (Saxholm & Rantanen, 2011).

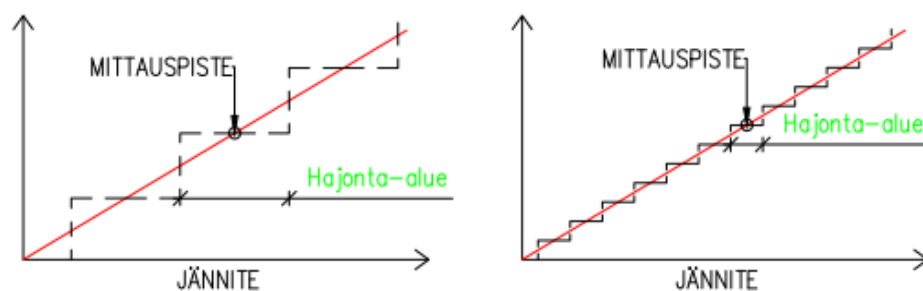
Painemittarin kalibroinnin epävarmuuteen liittyvät keskeisimmät tekijät ovat (Saxholm & Rantanen, 2011):

- Mittaustulosten hajonta
- Kalibroitavan laitteen resoluutio
- Mittanormaalin epävarmuus
- Hystereesi
- Korkeuskorjaukseen liittyvä epävarmuus

Kenttämittauksia suoritettaessa mittaustuloksen luotettavuuteen liittyy myös olennaisena osana mittausyksiköiden käsittelyn ja asennusten varmuus. Mittalaitteiden käsittelyssä tulee varmistua siitä, etteivät komponentit pääse vaurioitumaan kuljetuksen tai asennusten yhteydessä. Mittausyksikön paineletkun asentaminen ulkoilman paineletkun kanssa samalle korkeudelle on esimerkki asennuksessa tehtävistä huomioista. Asentamisen aikana on myös varmistuttava riittävästä pölyn hallinnasta.

#### 4.3.1 Mittalaitteen resoluutio

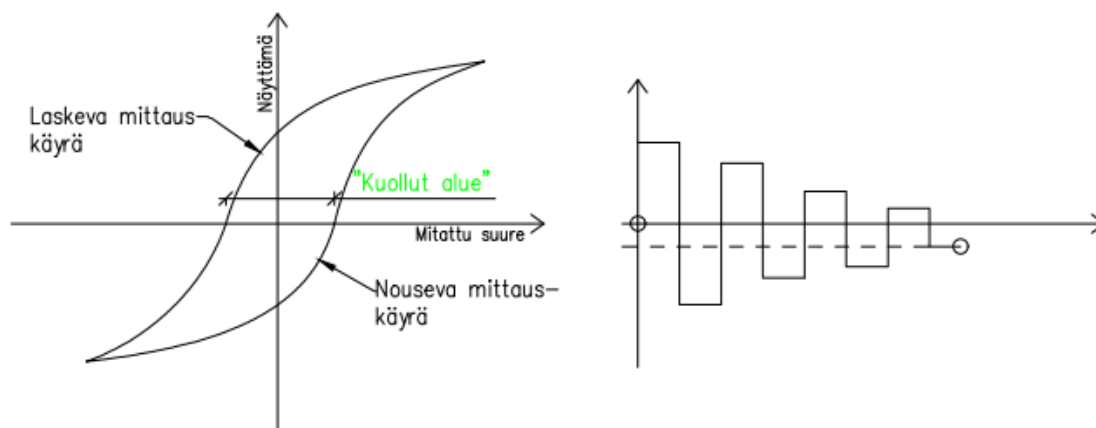
Mittalaitteen resoluutiolla tarkoitetaan mittarin erottelukykä. Resoluutio on eri asia, kuin tarkkuus. Digitaalisella mittalaitteella resoluutiolla tarkoitetaan bittien erottelukykä. Digitaalisilla mittareilla erottelukykä voi olla esimerkiksi kahdeksan-, kymmenen- tai kaksitoistabittinen eli toisin sanoen mittalaite pystyy erottelemaan  $2^8 = 256$ ,  $2^{10} = 1024$  tai  $2^{12} = 4096$  eri mittaustasoa. Analogisen mittalaitteen (esim. jännite, sähkövirta, aaltomuoto) signaalin muuttamiseen digitaalseksi käytetään analogia-digitaalimuunninta (AD-muunnin). AD-muunnos asettaa osaltaan rajan mittauksen resoluutiolle. Analogia-digitaalisessa mittausympäristössä mittalaitteen kokonaisresoluutio muodostuu mittalaitteen (mittausresoluutio) ja AD-muunnoksen yhteisestä resoluutiosta. Kokonaisresoluution vaikuttaa myös mahdollinen näyttölaitteen resoluutio. AD-muuntimen resoluutiolla voidaan siis suoraan vaikuttaa mittauskokonaisuuden erottelukykäyn. Tätä ilmiötä on käsitelty kuvassa 4.9. Esimerkiksi jänniteviestiä tuottavan analogisen mittalaitteen resoluutioksi saadaan noin 1 mV mittausalueella 0...1 V käytettäessä kymmenbittistä lineaarista AD-muunninta. Tämä tarkoittaa sitä, että AD-muunnin pystyy erottelemaan toisistaan 1024 jännitetasoa.



**Kuva 4.9** Lineaarisen AD-muuntimen resoluution merkityksen periaatekuva.

### 4.3.2 Hystereesi

Mitattaessa mittalaitteella suureen samaa arvoa muutossuunnan ollessa toisaalta kasvava ja toisaalta laskeva, näyttämissä esiintyy eroja, jota kutsutaan hystereesiksi. Hystereesi on järjestelmäominaisuus, joka hidastaa muutoksiin reagoimista tai estää systeemiä palaamasta alkuperäiseen tilaansa. Suureen muuttumisen viivästyminen hystereesin vaikutuksesta johtuu siitä, että suureen arvo ei riipu vain hetkellisistä vaikuttavista tekijöistä, vaan myös suureen aikaisemmasta arvosta. Hystereesistä johtuen mittauksessa esiintyy nk. ”kuollut alue” tai ”välys” kuvan 4.10 mukaisesti. Välykseen jääviä suuretietoja ei saada mittauksessa käyttöön.



**Kuva 4.10** Esimerkki hystereesistä. Kuvaajassa 1 on esitetty laskevan ja nousevan suureen mittauksen hystereesi. Kuvaajassa 2 on esitetty hystereesistä johtuva systeemin palautumisen estyminen alkuperäiseen tilanteeseen.

## 4.4 Mittausyksiköiden sijoittaminen kohteissa

Mittalaitteiden asennus kohteissa toteutettiin ilmanvaihtoalueittain. Ilmanvaihtoalueista mittaukseen otettiin mukaan pääkäyttötarkoituksen mukaiset tilat kuten luokka- ja kerho- huoneet sekä toimistotilat. Esimerkiksi keittiötiloihin ja porraskäytäviin ei asennettu paine-eron mittalaitteita. Rajoituksia mittalaitteiden asennuksille lisäsi myös rakennuksen ulkovaipan rakenne (ikkunoiden sijainnit ja koko, patterit ja yms.). Mittalaitteiden asennusten ensimmäisessä vaiheessa asennukset keskitettiin rakennusten ensimmäiseen

kerrokseen. Tarkoituksena oli asentaa ensimmäisessä vaiheessa mittalaitteet puoleen mitattavista ilmanvaihtoalueista. Mittausten kokonaisajan puoleessa välissä mittalaitteet on tarkoitus siirtää rakennuksissa toisille ilmanvaihtoalueille.

Mittausyksiköt asennettiin pareittain huonetilan ylä- ja alareunaan rakennuksen ulkoseinälle. Mittalaitteiden sijoittelusta rakennuksissa ja asennuksista on tarkemmin kohdassa 5.3 ja 5.4.1.

Kohteissa mitattiin paine-erojen lisäksi myös sisä- ja ulkoilman lämpötilaa sekä suhteellista kosteutta (RH). Näistä mittauksista tarkemmin kohdassa 4.4.2.

## 4.5 Tiedonsiirto ja tallennus

Paine-eroantureiden ulostuloviestin tulokset siirrettiin etänä käyttäen GSM-modeemia (mökkula). Isäntäpalvelimena ja tallennusympäristönä toimi Tampereen teknillisen yliopiston Rakennusfysiikan laitoksen käyttämä palvelin, johon muodostetaan pääsy (yhteys) käyttäen SCP-protokollaa. Suureiden mittaustulokset paine-eroantureilta tallentuvat excel-taulukkomuotoon, jolloin tulosten käytettävyys esimerkiksi taulukointiin ja kuvaajiksi on helppoa.

WinSCP (Windows Secure Copy Protocol) on ilmainen, suojattuun tiedostojen tiedonsiirtoon käytettävä tietokoneohjelma. SCP perustuu BSD (Berkeley Software Distribution) ja RCP (remote-copy) protokolliin. RCP mahdollistaa tiedostojen tiedonsiirron (kopiointi) käytettävän verkon yli. BSD viittaa Kalifornian yliopiston Computer Systems Research Group:n (CSRG) vuosina 1977-1995 kehittämään ja jakamaan Unix käyttöympäristöön. Nykyään termiä ”BSD” yleisesti käytetään mistä tahansa BSD-jälkeläisestä, mikä on kehitetty toimimaan Unixin kaltaisessa käyttöympäristössä.

WinSCP:n avulla voidaan siis muodostaa yhteys paine-erojen mittalaitteisiin mistä tahansa.

## 5. TUTKITTAVAT KENTTÄMITTAUSKOHTEET

### 5.1 Yleistä

Tutkittavina kohteina oli korjattuja ja uudispalvelurakennuksia (koulut ja päiväkodit). Kenttämittauskohteiden valinta pyrittiin suorittamaan Pirkanmaan alueen kohteista, jotta mittausten asennus- ja huoltotyöt olisivat mahdollisimman yksinkertaisia. Projektin varhaisessa vaiheessa kävi kuitenkin ilmi, että tutkimusryhmän kriteerit täyttäviä kohteita ei löytynyt riittävästi Pirkanmaan alueelta, joten mukaan otettiin myös kohteita Helsingin alueelta. Pirkanmaan alueelta mukana hankkeessa olivat Tampere, Kangasala, Lempäälä ja Pirkkala. Helsingin alueen kohteiden jako noudatti karkeasti itä-länsi-jakoa. Kohteiden valinnassa ja hyväksymisessä tehtiin yhteistyötä kaupunkien Tilakeskusten kanssa. Tilakeskuksilta saatiin käyttöön kohteiden käyttäjien ja huoltohenkilökunnan henkilötietoja, joiden kanssa voitiin sopia kohde- ja asennuskäyntejä. Kaupungeilta saatiin myös käyttöön heidän käyttämiensä kohdepankkien (esim. Haahtela Tampereella ja Pakki Helsingissä) käyttäjätunnukset ja salasanat. Tilakeskukset olivat lisänneet kohteiden käyttöoikeudet käyttäjäkohtaisesti tehtyjen kohdelistauksien perusteella järjestelmiin. Järjestelmistä saatiin käyttöön kohteiden suunnittelun ja toteutuksen asiakirjoja, kuten suunnitelmia, pöytäkirjoja, tarkastusasiakirjoja, tutkimustuloksia jne.

### 5.2 Kohteiden valintakriteerit

Kenttämittauskohteet jakaantuivat kahteen osaan: korjatut vanhat kohteet ja uudiskohteet. Kohteiden valinnassa painotettiin ensisijaisesti seuraavia asioita:

#### Uudiskohteet

- Mahdollisimman uusi kohde. Painotus mahdollisimman pienissä ilmanvuotoluvuissa.
- Kohteessa hygroskooppisia LTO-kennoja.
- COMBI-hankkeen muihin tarkasteluihin valittu kohde.

#### Vanhat kohteet

- Kohteet, joihin on tehty energiakorjauksia (ilmanvaihto ja/tai rakenteiden lisäeristäminen).
- Kohteet, joissa on havaittu suuria paine-eroja kuntotutkimuksissa.
- Kohteet, joihin ollaan lähitulevaisuudessa tekemässä energiakorjauksia (mittaukset mahdollisia ennen/jälkeen korjauksien).
- Kohteita, joissa on havaittu suuria energiankulutuksia.
- Kohteita, joissa havaittu olevan huono sisäilma (mikrobit, home, radon, yms.).

- Kohteessa hygroskooppisia LTO-kennoja.
- COMBI-hankkeen muihin tarkasteluihin valittu kohde.

Uudiskohteiden rakennusvuodet vaihtelivat 2006-2015 välillä. Näin ollen uudiskohteissa on rakennuksia, jotka on suunniteltu käyttäen tammikuussa 2010 voimaan tulleita määräyksiä ja toisaalta kohteita, joiden suunnittelussa on noudatettu heinäkuussa 2012 voimaan tulleita määräyksiä. Näin ollen uudiskohteet eivät ole lämmöneristystensä ja esimerkiksi ilmanvaihtojärjestelmiensä kesken vertailukelpoisia. Kohteiden valinnassa olikin tarkoitus kerätä riittävän kattava otos, joka edustaisi riittävällä tarkkuudella Suomen kouluja ja päiväkoteja niiden runko- ja taloteknisten järjestelmien osalta. Otannassa hyödynnettiin ns. ositettua otantaa, jossa otannalla pyritään varmistamaan, että otos on mahdollisimman edustava tutkimuksen kannalta merkittävien ryhmien osalta. Otannassa pyrittiin siihen, että otoksessa tärkeät ryhmät ovat samassa suhteessa yhtä edustettuja, kuin perusjoukossakin. Suomen palvelurakennuksien rakennejärjestelmissä on kohtalaisen suurta hajontaa, jolloin nyt valittujen kohteiden monimuotoisuus tuki osittaista otantaa. Toisaalta tutkimusryhmällä ei ollut käytettävissä täysin kattavia tietoja käytettävästä havaintoyksiköstä (Suomen palvelurakennukset), jolloin tulkintatavasta riippuen voidaan puhua myös ns. näytetutkimuksesta.

Vanhoissa kohteissa alkuperäiset rakennusvuodet vaihtelivat 1800-luvun lopulta 1980-luvulle. Kohteiden korjausvuodet sijoittuivat vuosien 2010-2015 välille. Kaikissa valituissa kohteissa oli toteutettu ilmanvaihdon saneeraukset, joissa kohteisiin oli asennettu (tai saneerattu olemassa oleva) koneellinen tulo-poisto-ilmanvaihto lämmön talteenotolla. Varsinaisia energiataloudellisia, rakennuksen rungon energiatehokkuuteen tähtääviä korjaustöitä ei oltu tehty kohteisiin. Vanhojen kohteiden osalta valinnoissa keskityttiin kohteisiin tehtyihin tutkimuksiin ja niissä mainittuihin ongelmiin kohteissa. Tällaisia ongelmia olivat esimerkiksi suuret paine-erot, huono sisäilma tai liian korkeat radonpitoisuudet. Kohdekohtaiset valintakriteerit on listattu kohdassa 4.2.1.

### **5.2.1 Valitut kohteet**

Mitattavia kohteita päätettiin valita tutkimukseen yhteensä 24 kappaletta jaon ollessa 12 uudiskohdetta ja 12 korjauskohdetta. Kohdan 4.2 mukaisten kriteerien mukaisesti mitattuihin valitut kohteet ovat seuraavan taulukon mukaiset.

**Taulukko 5.1 Kenttämittauksiin valitut kohteet.**Vanhat kohteet

Helsinki:

KOHDE	RAKENNUSVUOSI/ KORJAUSVUOSI	PERUSTELU VALINNALLE	ALA/ TILA- VUUS
Vartiokylän yläaste Rusthollarintie 6 00910 HELSINKI	1962, 1965/2012	Huono IV, tehty sisäilmatiivistyk- siä, toteutettu IV:n uusiminen, hy- groskooppisia kennoja	5245 brm <sup>2</sup> / 19269 m <sup>3</sup>
Lpk Sakara Kontulankaari 5 00940 HELSINKI	1971/2012	IV puutteellinen, lämpöenergianku- lutus tilastollisesti korkeaa tasoa, hygroskooppisia kennoja	1157 brm <sup>2</sup> / 3669 m <sup>3</sup>
Myllypuron ala-aste Yläkivenrinne 6 00920 HELSINKI	1966/2013	Puutteita IV:ssa, huomattavan kor- kea lämpöenergiankulutus (tieto vuodelta 1995), ajoittain korkeita CO <sub>2</sub> - pitoisuuksia	4723 kem <sup>2</sup> / 17776 m <sup>3</sup>
Porolahden perus- koulu Roihuvuorentie 2 00820 HELSINKI	1959/2012	IV:ssa ongelmia, suuria paine-eroja, tehty ilmanvuotokorjauksia	7112 kem <sup>2</sup> / 28095 m <sup>3</sup>
Herttoniemen ala- aste Ahmatie 1 00800 HELSINKI	1953/2010-2012	Huono sisäilma (hajuja), riittämätön IV, IV uusittu	5205 brm <sup>2</sup> / 19650 m <sup>3</sup>

Tampere:

KOHDE	RAKENNUSVUOSI/ KORJAUSVUOSI	PERUSTELU VALINNALLE	ALA/ TILA- VUUS
Koukkuniemi Ju- kola-talo Rauhaniementie 19 33180 TAMPERE	1800-luvun loppu/2011-2013	Kohteen saneeraustyö, IV:n uusimi- nen	4914 hum <sup>2</sup> / 18250 m <sup>3</sup>
Jussinkylän päivä- koti Sukkavartaankatu 4 33100 TAMPERE	1980/2014	Ilmanvaihdon perusparannus	2200 hum <sup>2</sup> / vanha 8990 m <sup>3</sup> uusi 9250 m <sup>3</sup>
Amurin päiväkot Suokatu 10 33230 TAMPERE	-/2015	Huono sisäilma	1022 hum <sup>2</sup> / 3821 m <sup>3</sup>
Koulukadun päivä- koti Koulukatu 8 33200 TAMPERE	-/2013	IV-muutos pelkkä poisto → tulo-poisto-IV	551 hum <sup>2</sup> / 2215 m <sup>3</sup>



## Lempäälä:

KOHDE	RAKENNUSVUOSI/ KORJAUSVUOSI	PERUSTELU VALINNALLE	ALA/ TILA- VUUS
Kuusimäen päivä- koti Välimäentie 13 33880 LEMPÄÄLÄ	-/2016	Pirkanmaan alueen kohde IV-saneeraus	900 hum <sup>2</sup> / vanha 1030 m <sup>3</sup> uusi 1440 m <sup>3</sup> yht. 2470 m <sup>3</sup>
Kuljun koulu Tampereentie 262 37560 LEMPÄÄLÄ	-/2006, 2015	Sisäilmasta johtuvaa oireilua. Mitattu aikaisemmin paine-suhteita lyhyellä aikavälillä → toteaminen pidemmällä aikavälillä	4402 kem <sup>2</sup> / -

## Pirkkala:

KOHDE	RAKENNUSVUOSI/ KORJAUSVUOSI	PERUSTELU VALINNALLE	ALA/ TILA- VUUS
Toivion koulu Korpitie 13 33920 PIRKKALA	-/2012	Epäonnistunut korjaus, suuret paine- erot	1.krs. 778 m <sup>2</sup> 2.krs. 584 m <sup>2</sup> /13233 m <sup>3</sup>

Uudiskohteet

## Helsinki:

KOHDE	RAKENNUSVUOSI	PERUSTELU VALINNALLE	ALA/ TILA- VUUS
Kulosaaren korttelitalo Kyösti Kallion tie 1 00570 HELSINKI	2013	Uusi kohde, hygroskooppisia kennoja, LTO-laitteisia	4764 kem <sup>2</sup> / 20279 m <sup>3</sup>
Ruskeasuon päiväkot Paraistentie 7-9 00280 HELSINKI	2015	Uusi kohde, energiatehokkaaksi suunniteltu kohde	2020 kem <sup>2</sup> / 4126 m <sup>3</sup>
Kalasataman korttelitalo Polariksenkatu 1 00540 HELSINKI	2015	Uusi kohde, energiatehokkaaksi suunniteltu kohde	4190 kem <sup>2</sup> / 20400 m <sup>3</sup>
Korttelitalo Kanava Aurinkotuulenkatu 11 00990 HELSINKI	2012	Uusi kohde, COMBI-hankeen tarkasteluihin valittu kohde	3043 kem <sup>2</sup> / 10431 m <sup>3</sup>
Lpk Omenapuisto Punakanelinkuja 1 00990 HELSINKI	2013	Uusi kohde, COMBI-hankeen tarkasteluihin valittu kohde	722 kem <sup>2</sup> / 3580 m <sup>3</sup>

## Tampere:

KOHDE	RAKENNUSVUOSI	PERUSTELU VALINNALLE	ALA/ TILA-VUUS
Luhtaan päiväkoti Luhtaankatu 10 33560 TAMPERE	2012	Uusi kohde, passiivienergiata- voitteet täyttävä kohde, COMBI-hankkeen tarkastelui- hin valittu kohde.	1388 hum <sup>2</sup> / 6450 m <sup>3</sup>
Vuores-talo (1.,2.vaihe) Rautiolanrinne 2 33870 TAMPERE	2013	Uusi kohde, Tre Tilakeskuksen pilottikohde, COMBI-hankeen tarkasteluihin valittu kohde	10796 hum <sup>2</sup> / yht. 99400 m <sup>3</sup>
Koukkuniemi Impivaara Rauhaniementie 19 33180 TAMPERE	2013	Uusi kohde, Tre Tilakeskuksen pilottikohde, COMBI-hankeen tarkasteluihin valittu kohde	4750 hum <sup>2</sup> / 19300 m <sup>3</sup>

## Kangasala:

KOHDE	RAKENNUSVUOSI	PERUSTELU VALINNALLE	ALA/ TILA-VUUS
Koivurinteen pk ja koulu Ruutanantie 748 36110 RUUTANA	2014	Uusi kohde, voimassa olevia energiamääräyksiä parempi kohde	2350 hum <sup>2</sup> / 9466 m <sup>3</sup>
Liuksialan päiväkoti Ahulinjärventie 23 36200 KANGASALA	2012	Uusi kohde, voimassa olevia energiamääräyksiä parempi kohde	1559 hum <sup>2</sup> / 6540 m <sup>3</sup>

## Lempäälä:

KOHDE	RAKENNUSVUOSI	PERUSTELU VALINNALLE	ALA/ TILA-VUUS
Kuljun koulun laajennus Tampereentie 262 37560 LEMPÄÄLÄ	2006	Uusi kohde, liittyy mitattavaan korjauskohteeseen	4402 kem <sup>2</sup> / 19130 m <sup>3</sup>

## Pirkkala:

KOHDE	RAKENNUSVUOSI	PERUSTELU VALINNALLE	ALA/ TILA-VUUS
Toivion koulun laajennus Korpitie 13 33920 PIRKKALA	2012	Uusi kohde, liittyy mitattavaan korjauskohteeseen	3912 brm <sup>2</sup> / 13233 m <sup>3</sup>

Tämän diplomityön teon aikana kaikkien kohteiden mittalaitesennuksia ei oltu tehty. Tässä diplomityössä keskitytään esittämään vain työn aikana valmistuneiden asennusten

tulokset määräytyistä kohteista. Tähän työhön tulosten osalta mukaan otetut kohteet ovat Helsingin kohteita:

- Vartiokylän yläaste (saneerauskohde)
- Lpk Sakara (saneerauskohde)
- Myllypuron ala-aste (saneerauskohde)
- Kulosaaren korttelitalo (uudiskohde)
- Ruskeasuon päiväkotia (uudiskohde)
- Kalasataman korttelitalo (uudiskohde)
- Korttelitalo Kanava (uudiskohde)
- Lpk Omenapuisto (uudiskohde)
- Lpk Tilhi (saneerauskohde)
- Lpk Keula (saneerauskohde)

### 5.3 Mittauksien laajuudet kohteissa

Liitteessä 3 on esitetty mitattavien kohteiden pohjapiirustukset, joihin on merkittynä asennettujen mittalaitteiden sijainnit, laitteiden tunnuksat, asennuspäivämäärät ja -ajat. Mittauksia tehdään ilmanvaihtoalueittain.

### 5.4 Mittausyksiköiden asennustyö kohteissa

Mittalaitteiden asennustyöhön tarvittavia varusteita ja materiaaleja:

- Mittalaitteet (paine-ero, T+RH).
- Ulkopuolen paineletkun sääsuojat (kojerasia).
- Jatko- ja A-tikkaat sisä- ja ulkoasennuksiin.
- Iskuporakone (kiviaineksille) ja akkuporakone (puulle ja ruuvien asennukseen). Iskuporakone oli akullinen, mikä nopeutti asennustyötä huomattavasti, koska sähköjohtojen kuljettaminen rakennuksesta ulos ja ulkoa sisään jäi pois asennustyöstä. Koneisiin tarvittiin poria kiviainekselle ja betonille (Ø6 ja Ø10 mm) sekä puulle (Ø10 mm).
- Kiinnikkeitä: ruuvitulppia ja ruuveja ruuvikiinnityksiin kiviaineksiin. Puuruuveja ruuvikiinnityksiin puumateriaaleihin. Ilmastointiteippiä virtajohtojen sitomiseen seinälle sekä ulos tulevan paineletkun kiinnittämiseen ohjausrimaan (paineletkua oli mahdoton viedä ulkoseinän läpi ilman ohjausrimaa).
- Elastista ja sään kestävää tiivistysmassaa letkujen ja ulkopuolen sääsuojiin tiivistämisiin sekä massapistooli.
- Sivuleikkurit letkujen ja nippusiteiden katkaisemiseen. Talttapäinen ruuvimeisseli paine-eromittarin kotelon kannen aukaisemiseen ja sulkemiseen.
- Kohteiden pohjakuvat merkintöjä varten. Kamera dokumentointia varten. Mittalaitteiden ”koskeminen kielletty”- laput ja kiinnitykseen sinitarraa.
- Imuri siivousta varten.

### 5.4.1 Paine-eromittareiden asennus

Mitattaviin kohteisiin kulkeminen sovittiin kaupunkien Tilakeskusten ja huoltoyhtiön (Helsingissä Palmia Oy) kanssa. Helsingissä mitattavat kohteet sijoituivat kaupungin vastuualueista itäiselle ja läntiselle puolelle. Näin ollen kohdekäynneistä tuli sopia erikseen vastuualueiden vastuuhenkilöiden kanssa erikseen. Kouluissa yhteyshenkilönä toimi poikkeuksetta kohteen kouluisäntä. Palmia Oy:n kanssa yhteistyö sujui ongelmitta ja heidän puoleltaan osoitettiin tehtäviin mittauksiin suurta mielenkiintoa, koska nyt tehtävät mittaukset lisäisivät myös heidän ymmärrystään huollon piirissä olevista kohteista.

Paine-eroanturit asennettiin kohteisiin pareittain siten, että mitattavaan huonetilaan asennettiin anturit huonetilan ylä- ja alareunaan. Asennuksissa pyrittiin noudattamaan kaavaa, jossa huonetilan yläreunaan asennettava mittalaite on noin 10-20 cm:ä katosta alaspäin ja huonetilan alareunan mittalaite noin 20 cm lattiasta ylöspäin. Joissakin kohteissa asennuksiin jouduttiin tekemään pieniä muutoksia johtuen rakenteellisista esteistä (ikkunat, patterit, yms.). Asennukset aloitettiin mittalaitteiden käyttökuntoon laittamisella. Mittareiden käyttökuntoon laittamisessa koteloiden kannet aukaistiin ja tarkistettiin komponenttien liittimet sekä alustan kiinnitykset. Tämän jälkeen mittalaitteet yhdistettiin verkkovirtaan, jolloin mittalaitteiston toiminta voitiin nähdä merkkivaloista. Ennen varsinaista asennustyötä mittalaitteiden tuli olla verkkovirrassa noin 10 minuuttia siten, että rakennuksen ulkopuolisen paineletkun pää oli tuotu lähelle sisäpuolista painepäätä. Näin mittalaitteen nollassa ”ohjelmoitui” laitteelle ja mitattavat paine-erot olivat vertailukelpoisia.

Yläreunan mittalaitteet asennettiin pääsääntöisesti kiinteästi seiniin mittalaitteen kotelon takakannesta kahdella kivitulpalla ja ruuveilla. Poikkeuksen tähän toi sellaiset tilat, missä mittalaite voitiin asentaa kevyesti esimerkiksi vesijohtojen tai verhokotelon päälle.



**Kuva 5.1** Mittalaite asennettu kiinteästi seinälle (Kulosaaren korttelitalo, huone 170).

Mittalaitteiden asennukset pyrittiin tekemään kaikkialle mahdollisimman vaakasuoraan, jotta itse asennustyöstä ei aiheutuisi turhaa virhettä tuloksiin.



**Kuva 5.2** Mittalaite asennettu putkien päälle ilman kiinteää asennusta (Lpk Sakara, huone 135).

Alareunan mittalaitteiden asennukset tehtiin joko kevyesti tai kiinteästi. Kiinteässä asennuksessa mittalaite asennettiin kiinteästi seinään kivitulpilla ja ruuveilla. Kevyessä asennuksessa mittalaite makaa pystyasennossa lattialla. Asennuksen laatuun vaikutti asennuspaikka. Kiinteitä asennuksia tehtiin sellaisiin tiloihin, missä ihmisvirrat olivat suuria (käytävä, ruokala). Kevyet asennukset tehtiin tiloihin, missä käyttäjinä ovat pelkästään aikuiset tai mittalaitteiden asemoinnista ja valvonnasta ei tule ongelmia.



**Kuva 5.3** Alareunan mittalaitteen kiinteä asennus seinälle (Kalasataman korttelitalo, tila 1059).

Laitteiden johtojen keräämisessä oli ajoittain ongelmaa.



**Kuva 5.4** Alareunan mittalaitteen kiinteä asennus seinälle (Kalasataman korttelitalo, huone 1201).

Mittalaitteiden asennuksissa kohdattiin myös odottamattomia ongelmia. Kalasataman korttelitalon asennuksien jälkeen tilaajalta tuli viesti kohteessa tehtävistä kuvauksista esittelytarkoituksessa. Asennetut mittalaitteet eivät saisi näkyä kuvauksissa. Asia ratkaistiin tilaajan ja arkkitehdin välillä ”verhoilemalla” mittalaitteet kuvauksien ajaksi.



**Kuva 5.5** Mittalaitteen kevyt asennus lattialla opettajien taukotilassa pöytätason alapuolella (Kulosaaren korttelitalo, huone 110).



**Kuva 5.6** Mittalaitteiden sijainnit toisiinsa nähden (Lpk Omenapuisto, huone 29).

Asennusten aikana mukana pidettiin kohteiden pohjapiirustuksia. Kaikkien asennusten yhteydessä pohjapiirustuksiin merkittiin mittalaitteen tunnus, huonekorkeus, asennusajankohta ja kellonaika sekä asennuskorkeudet sidottuna lattian korkeuteen.

Asennuksissa vakiotekniikaksi muodostui ulkoseiniin tulevien reikien tekeminen kaikkiin mitattaviin tiloihin kerralla. Samaan aikaan mittalaitteet oli kytkettynä verkkovirtaan, jolloin reikien teon jälkeen mittalaitteiden nollatason ohjelmointi oli ajallisesti riittävä ja mittalaitteet olivat asennusvalmiit. Kiviseiniin (betoni, tiili) reiät tehtiin käyttäen Ø10 mm kiviporaa. Porakoneena käytettiin akkukäyttöistä iskuporakonetta. Puumateriaaleihin reiät tehtiin käyttäen Ø10 mm puuporaa. Korjauskohteissa jouduttiin käyttämään kahta kiviporaa (pituus 405 ja 950 mm) johtuen ulkoseinärakenteiden paksuuksista.

Koteloiden kiinteiden ja kevyiden asennusten jälkeen kotelon kansi suljettiin. Ulkopuolen paineletku vietiin ulkoseinän läpi ulkoilmaan siten, että paineletku ei ollut kierteellä tai lommahtaneena sisätilassa. Paineletkun pujotuksessa seinän läpi apuna käytettiin 600 mm:n pituista puutikkua, mikä oli kaarevan letkun asennuksessa välttämätön apuväline.



Paineletkun ulosviennin jälkeen paineletkun ja seinän sisäkuoren liitos tiivistettiin. Tiivistysmassana käytettiin säänkestävää elastista liima-/tiivistysmassaa. Tiivistysmassan asennuksessa pyrittiin siihen, että massan tunkeuma seinän sisään oli vähintään 20 mm:ä. Tiivistysten jälkeen mittalaitteen virtajohdot kiinnitettiin seinille käyttäen ilmastointiteippiä. Lattialle kevyesti asennettujen mittalaitteiden virtajohdot kasattiin koteloiden tai vesijohtojen tms. taakse kerälle.



**Kuva 5.7** Virtajohto kiinnitetty seinälle (Myllypuron ala-aste, huone 152).

Kaikkien mittalaitteiden yhteyteen sijoitettiin laitteiden koskemisen kieltävä huomautus. Huomautuksessa oli kiellon lisäksi ilmoitettu yhteystiedot mahdollisia käyttäjän yhteydenottoja varten. Mittalaitteiden asennusten tiedottamisen käyttäjille hoiti Tilakeskus. Asennusten yhteydessä suora tiedottamista tehtiin myös kohteiden kouluisännille ja huoltohenkilökunnalle.

Ennen ulkopuolen asennuksia kaikki sisätilat siivottiin imuroimalla ja mahdollisesti siirretyt kalusteet palautettiin niiden alkuperäiselle paikalle.

Ulkopuolen asennuksiin kuului ulkopuolisen paineletkun päähän sijoitettavan sääsuojan asennukset. Sääsuojana toimi tavallinen, alareunastaan auki oleva sähkökojerasia. Kojerasian takakanteen tehtiin puukolla reikä paineletkulle. Kojerasiat valmisteltiin asennuksia varten irrottamalla rasian kansi ja kiertämällä rasiassa valmiina olevat ruuvit auki. Tämän jälkeen kansi asennettiin takaisin paikalleen ja kojerasian ruuvit kiinnitettiin takaisin kannen läpi. Näin ollen rasian kantta ei saataisi irrotettua ilman työkaluja ilkeivallan vähentämiseksi. Paineletku katkaistiin noin 30 mm:ä ulkoseinän ulkopuolelta sivuleikkureilla. Ennen kojerasian asennusta letkun juuri tiivistettiin seinään, kuten sisäpuolellakin. Sääsuojat asennettiin kiviseiniin kivitulpilla ja ruuveilla, puuseiniin ruuveilla. Kiinnitykset tehtiin rasian vastakkaisista nurkista kahdella kiinnittimellä. Ennen kiinnitystä rasian



takakannen letkureiän ympärille pursotettiin tiivistysmassa yhtenäiseksi kaistaksi. Kiinnitysten jälkeen rasian reunat tiivistettiin tarvittaessa vesitiiviiksi tiivistysmassalla. Ennakkoon oli tiedossa, että varsinkin kivirakenteisissa ulkokuorissa tulisi tapahtumaan pinnan lohkeamista porattaessa iskevällä poralla sisältä ulos päin. Käyttäjää tiedotettiin tästä ominaisuudesta ennakkoon ja julkisivujen vauriot luvattiin korjata Tampereen teknillisen yliopiston toimesta mittausten päätyttyä.



**Kuva 5.8** Ulkopuolen asennetut kojerasiat. Rasiat on tiivistetty seinään tiivistysmassalla (Vartiokylän yläaste).

Kojerasioiden asennuksissa rasioita jouduttiin asentamaan sellaisille paikoille, missä ihmisiä kulkee runsaasti myös rakennuksen käyttöajan ulkopuolella. Tämä lisää kojerasioihin kohdistuvan ilkivallan riskiä.



**Kuva 5.9** Ulkopuolen paineletkujen sääsuojuksi asennettuja kojerasioita (Lpk Ruskeasuo).

### 5.4.2 Lämpötila-, hiilidioksidi- ja RH- mittareiden asennukset kohteissa

Kohteissa tutkittiin/tutkitaan myös rakennusten sisä- ja ulkoilman lämpötiloja, suhteellisia kosteuksia (RH) sekä hiilidioksidipitoisuuksia. Sisäpuolen lämpötilojen ja suhteellisen kosteuden sekä hiilidioksidin mittaukset suoritettiin/suoritetaan käyttäen kuvassa 5.10 esitettyjä Comark N2003 Diligence EV Temperature and Humidity Data Logger-mittalaitteita sekä Rotronic CL11- yhdistelmälaitteita. Comarkin mittalaitteita oli hankittuna valmiiksi rakennusfysiikan tutkimusryhmään aikaisempien tutkimusten yhteydessä. Tässä tutkimuksessa käytetty Comarkin mittari on vuoden 2003 malli. Mittarista on saatavilla päivitetty, vuoden 2016 heinäkuussa päivitetty versio. Liitteessä 4 on esitetty mittalaitteen (N2003) tekniset tiedot.



*Kuva 5.10 Comark N2003- ja Rotronic CL11- mittalaitteet.*

Comark- mittalaitteen käyttöönotto alkoi mittalaitteen manuaalisella ohjelmoinnilla käyttäen laitevalmistajan tuottamaa ohjelmistoa. Ohjelmiston avulla mittarille voitiin syöttää pika-asetuksena mitattavat suuret, mittausten aloitus- ja lopetusajankohdat sekä mitausintervalli. Datapisteiden loggausväliksi (intervalli) valittiin 60 minuuttia. Mittalaitteiden tarkkuudet oli tarkistettu rakennustekniikan laboratoriossa keväällä/kesällä 2016. Niiden mittanäyttämien hajonta oli  $\pm 0,4 \dots 3,0$  prosenttia referenssinäyttämästä. Comark-mittalaitteet asennettiin mitattavien kohteiden tiloihin, joihin ei asennettu paine-eron mittalaitteita. Comarkit pyrittiin sijoittamaan kohteissa siten, että niihin käsiksi pääsy olisi hankalaa ilkvallan estämiseksi, mutta kuitenkin siten, että mittalaitteiden mittauksiin ei tulisi häiriöitä esimerkiksi läheisten ilmanvaihtoventtiilien takia.



**Kuva 5.11** Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittalaitteiden sijoittelua (ensimmäinen kuva Lpk Ruskeasuo, tila 130. Toinen kuva Korttelitalo Kanava, tila 040).

Comarkien yhteyteen kiinnitettiin mittalaitteiden koskemista kieltävä muistutus samoin, kuin paine-eromittareiden yhteyteen.

Sisätilan suhteellisen kosteuden, lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden mittaus niillä alueille, mihin asennettiin paine-eromittareita, tehtiin käyttäen Rotronic CL11- mittalaitteita. Rotronic- mittalaitteiden asennukset tapahtuivat kuten Comarkeilla sillä erotuksella, että Rotronic- laitteet kytkettiin verkkovirtaan. Liitteessä 5 on esitetty Rotronic CL11 data-loggerin tekniset tiedot.

Ulkoilman olosuhdemittauksia ei tehty tämän diplomityön aikana.

## 6. TULOKSET

### 6.1 Kenttämittausten tulokset

Tässä diplomityössä esitellään kymmenen Helsingissä sijaitsevan case-kohteen paine-eromittausten tulokset. Tarkoituksena on havainnollistaa mittausten alkuvaiheessa mittauksista saatavan datan laajuutta ja tarkkuutta sekä käytettävyyttä tulevilla mittauksilla ja analyyseillä.

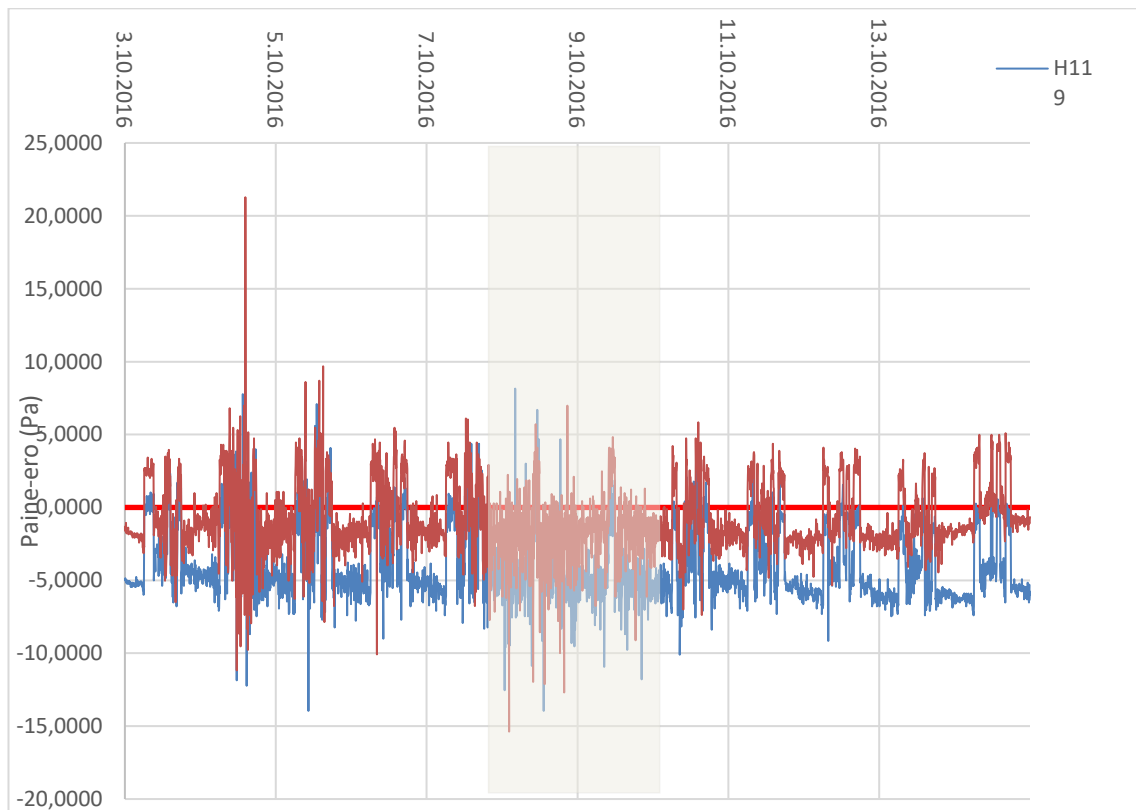
Tulokset ovat esitetty kustakin kohteesta sekä kuvaajana että taulukossa. Kuvaajassa esitetyt tulokset ovat yhden huoneen ylä- ja alaosan mittalaitteiden tulokset. Kuvaajan tarkoituksena on havainnollistaa mittaustulokset lyhyeltä ajanjaksolta. Kuvaajan käyttö pitkäaikaisissa, tuhansia mittauspisteitä sisältävässä tutkimuksessa ei ole käytännöllinen tapa. Käytännöllisempi ja tulosten tulkinnassa sekä analyysissä soveltuvampi tapa on ilmoittaa taulukkomuodossa kohteen painesuhteiden osuus koko aikavälillä. Tämän lisäksi tuloksissa ilmoitetaan mittaustulosten keskiarvo ja mediaani sekä 99 % ja 1 % persentiilit. Persentiilien tarkoituksena on antaa realistisempaa tietoa mittauspisteiden arvojen jakaumasta datajoukon ylä- ja alapäässä, koska yksittäinen mittausjakson suurin tai pienin arvo ei anna oikeaa kuvaa koko mittaustulosten joukosta.

Kuvaajassa esitettyjen tulosten mittausaikaväli oli 3.10.16 0:00 – 14.10.16 23:59. Näin ollen kuvaajan tulokset osuvat kahden täyden arkiviikon ja yhden viikonlopun ajalle. Taulukoissa esitettyjen tulosten mittausaikaväli oli 1.10.16 0:00 – 29.11.16 12:00. Näin ollen taulukon tulokset antavat kattavamman kuvan pitkäaikaisen paine-eromittauksen mittaus-tuloksista.

Kuvaajan mittaustulosten etumerkki kertoo painesuhteiden suunnan. Tuloksen ollessa  $< 0$ , niin huoneen sisäilma on alipaineinen ulkoilmaan nähden. Tuloksen ollessa  $> 0$ , niin huoneen sisäilma on ylipaineinen ulkoilmaan nähden.

Kohteiden tuloksissa esitetyt yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet ovat huoneen ylä- ja alareunan molempien mittareiden yhteisten tulosten mukaan esitetyt arvot.

### Lpk Keula



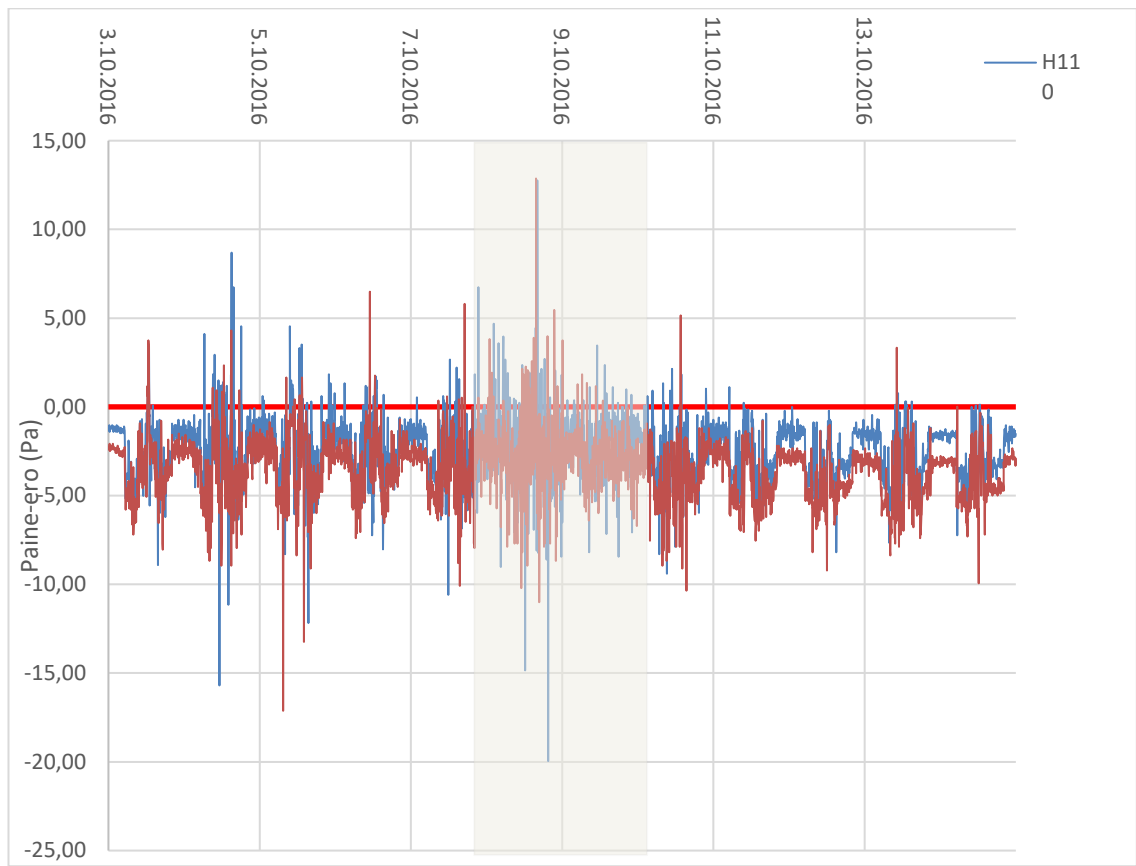
**Kuva 6.1** Mittalaite H105 on huoneen yläreunassa 234 cm lattiasta ja H119 huoneen alareunassa 30 cm lattiasta. Harmaa alue kuvastaa lauantaita ja sunnuntaita.

Kuvaajasta nähdään, että huoneen alareuna on selkeästi alipaineinen yläreunaan nähden. Tällainen tulos on rakennuksiin muodostuvien painesuhteiden osalta ennakkokäsitysten mukainen.

**Taulukko 6.1** Lpk Keula kahden kuukauden aikavälin mittaustulosten arvot. Mittaustuloksia oli aikavälillä yhteensä 51445 kappaletta.

Keskiarvo, persentiili ja vaihteluväli	Yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet
Mittausjakson suurin alipaine <b>-33,84 Pa</b>	<b>76,14 %</b> ajasta alipaineinen
Mittausjakson suurin ylipaine <b>69,83 Pa</b>	<b>23,86 %</b> ajasta ylipaineinen
99 % persentiili <b>5,70 Pa</b>	
1 % persentiili <b>-9,73 Pa</b>	
Mittausjakson keskiarvo <b>-2,31 Pa</b>	
Mittausjakson mediaani <b>-2,72 Pa</b>	

### Lpk Sakara



**Kuva 6.2** Mittalaite H110 on huoneen yläreunassa 260 cm lattiasta ja H111 huoneen alareunassa 20 cm lattiasta. Harmaa alue kuvastaa lauantaita ja sunnuntaita.

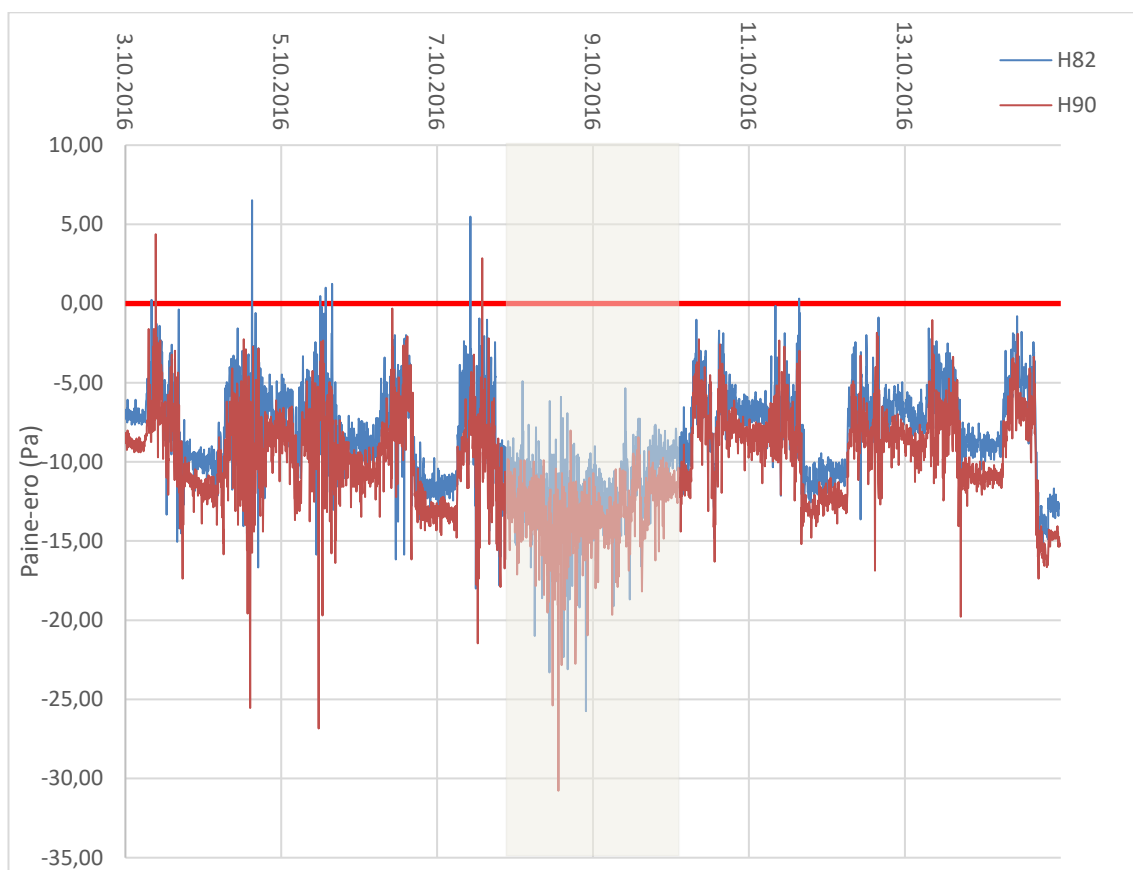
Huoneen ylä- ja alareunan paine-erot ovat toisiinsa nähden ennakkokäsitysten mukaiset.

**Taulukko 6.2** Lpk Sakara kaikkien aikavälin mittaustulosten arvot. Mittaustuloksia oli aikavälillä yhteensä 53467 kappaletta.

Keskiarvo, persentiili ja vaihteluväli	Yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet
Mittausjakson suurin alipaine <b>-41,10 Pa</b>	<b>96,32 %</b> ajasta alipaineinen
Mittausjakson suurin ylipaine <b>33,56 Pa</b>	<b>3,68 %</b> ajasta ylipaineinen
99 % persentiili <b>1,66 Pa</b>	
1 % persentiili <b>-10,09 Pa</b>	
Mittausjakson keskiarvo <b>-3,37 Pa</b>	
Mittausjakson mediaani <b>-3,20 Pa</b>	

Kohde on lähes kokonaan alipaineinen, mikä vastaa nykyisiä ilmanvaihdon suunnittelu-parametreja. 1 % persentiilin arvo viittaisi kohteessa vallitsevan liian suuria alipaineita myös hetkellistä pidemmällä aikavälillä.

### Lpk Tilhi



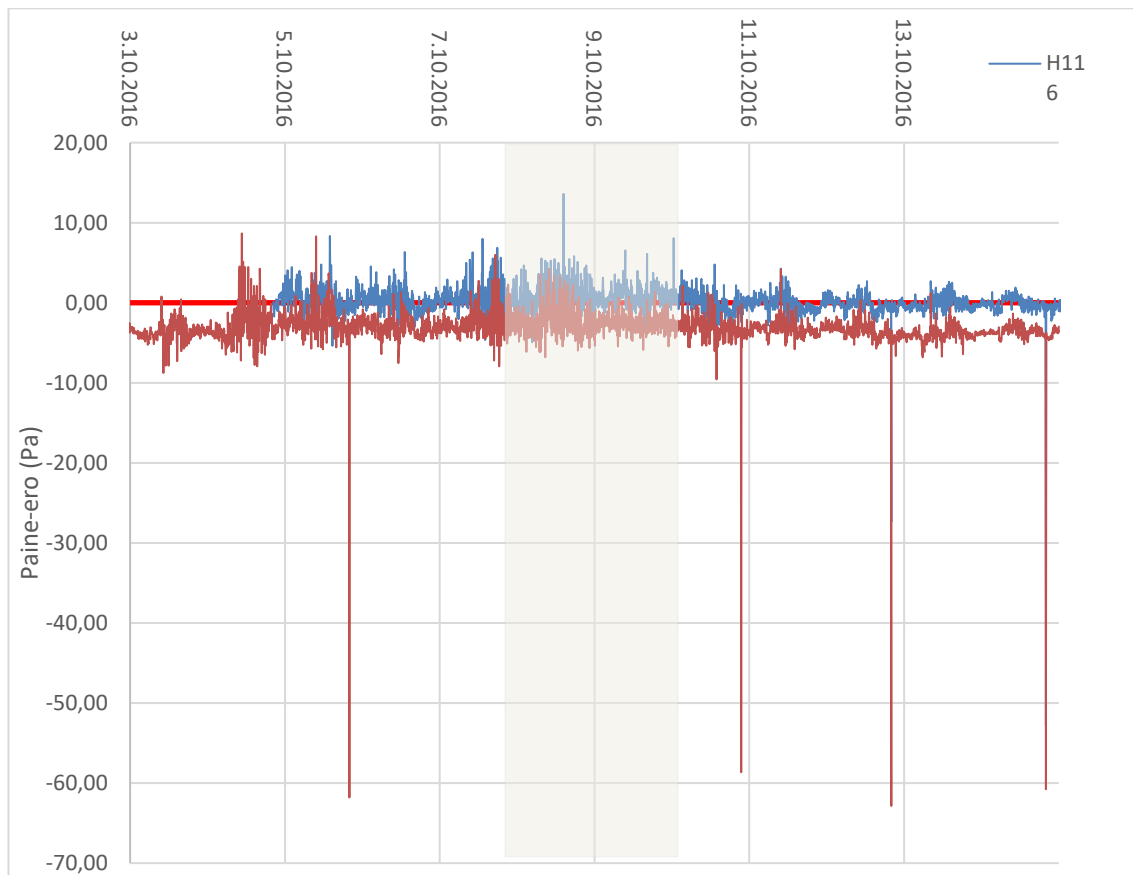
**Kuva 6.3** Mittalaite H82 on huoneen yläreunassa 216 cm lattiasta ja H90 huoneen alareunassa 30 cm lattiasta. Harmaa alue kuvastaa lauantaita ja sunnuntaita.

Huoneen ala- ja yläosasta mitatut paine-erot ovat toisiinsa nähden odotusten mukaiset. Kuvasta kuitenkin nähdään, että huonetila on selkeästi liian alipaineinen. Alipaine on lisäksi suurempi ilta- ja yöaikaan sekä viikonloppuna.

**Taulukko 6.3** Lpk Tilhi kaikkien aikavälin mittaustulosten arvot. Mittaustuloksia oli aikavälillä yhteensä 63941 kappaletta.

Keskiarvo, persentiili ja vaihteluväli	Yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet
Mittausjakson suurin alipaine <b>-40,96 Pa</b> Mittausjakson suurin ylipaine <b>73,91 Pa</b> 99 % persentiili <b>0,08 Pa</b> 1 % persentiili <b>-22,03 Pa</b> Mittausjakson keskiarvo <b>-9,27 Pa</b> Mittausjakson mediaani <b>-8,85 Pa</b>	<b>98,97 %</b> ajasta alipaineinen <b>1,03 %</b> ajasta ylipaineinen

### Myllypuron ala-aste



**Kuva 6.4** Mittalaite H116 on huoneen yläreunassa 320 cm lattiasta ja H112 huoneen alareunassa 25 cm lattiasta. Harmaa alue kuvastaa lauantaita ja sunnuntaita.

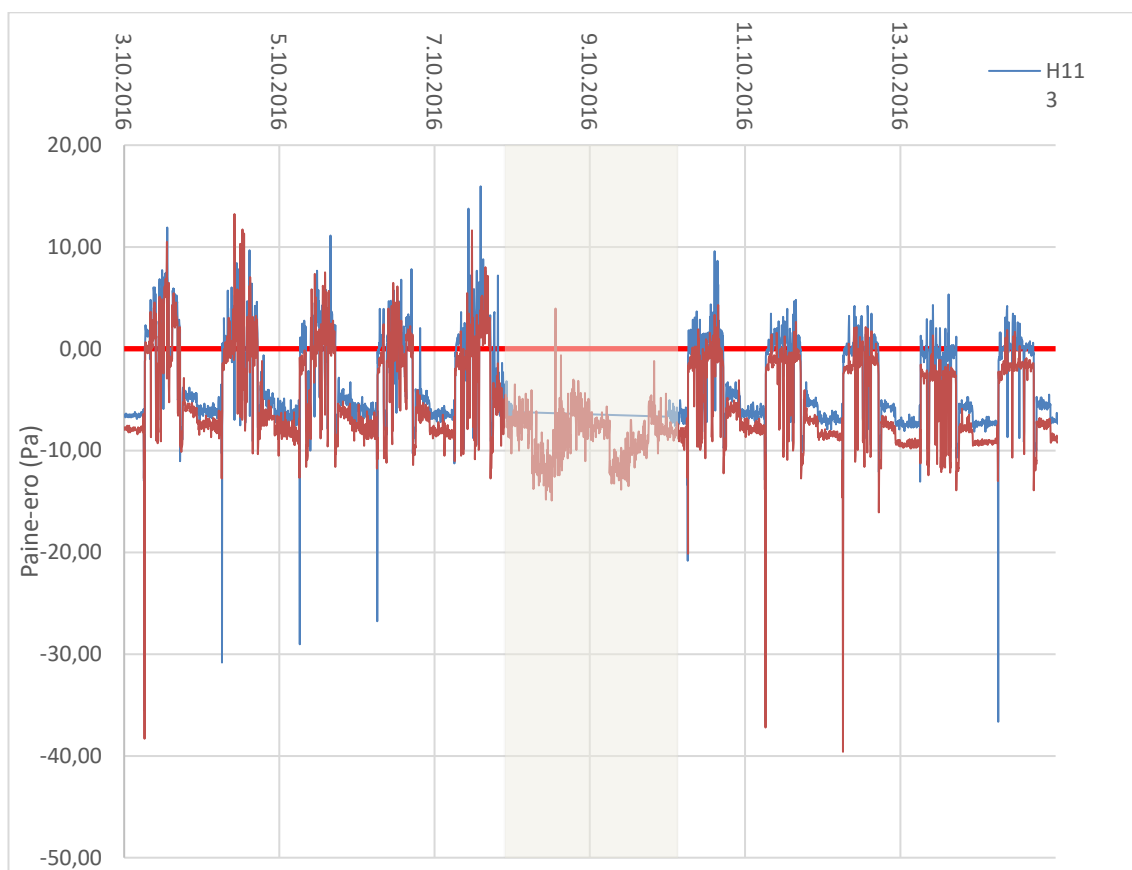
Kuvaajan mukaan huoneeseen muodostuu äkillisiä, huomattavia alipainepiikkejä. Piikkien kellonaika on joka piikin kohdalla noin 20:00. Kuvaajakäyrien vaihtelu on toisaalta muuten varsin pieni.

**Taulukko 6.4** Myllypuron ala-asteen kaikkien aikavälin mittaustulosten arvot. Mittaustuloksia oli aikavälillä yhteensä 48121 kappaletta.

Keskiarvo, persentiili ja vaihteluväli	Yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet
Mittausjakson suurin alipaine <b>-68,59 Pa</b>	<b>81,83 %</b> ajasta alipaineinen
Mittausjakson suurin ylipaine <b>42,26 Pa</b>	<b>18,12 %</b> ajasta ylipaineinen
99 % persentiili <b>4,34 Pa</b>	
1 % persentiili <b>-8,28 Pa</b>	
Mittausjakson keskiarvo <b>-2,37 Pa</b>	
Mittausjakson mediaani <b>-2,72 Pa</b>	



### Vartiokylän yläaste



**Kuva 6.5** Mittalaite H113 on huoneen yläreunassa 255 cm lattiasta ja H108 huoneen alareunassa 20 cm lattiasta. Harmaa alue kuvastaa lauantaita ja sunnuntaita.

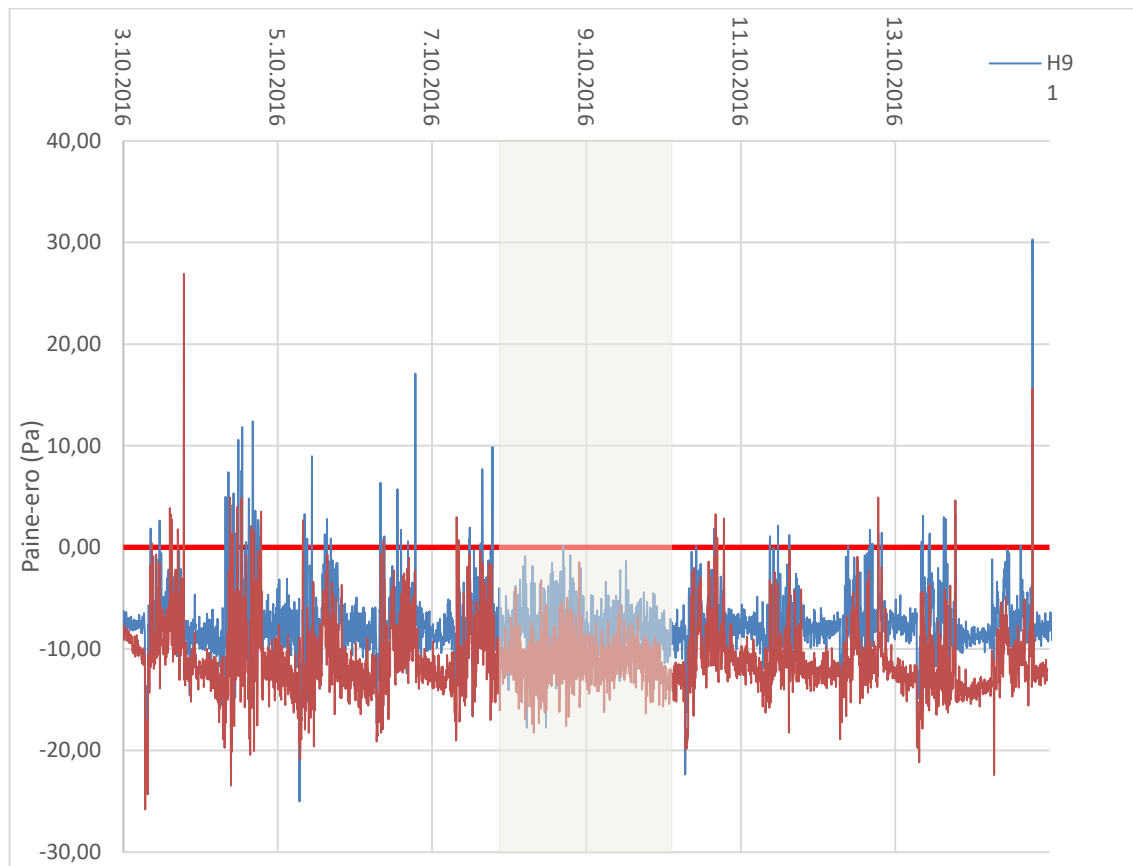
Ilmanvaihdossa on paljon äkillisiä muutoksia aamuaikaan noin 6:15. Tämä viittaa ilmanvaihdon lisäyksen alkamiseen rakennuksen vuorokausittaisen käyttöajan alkaessa.

**Taulukko 6.5** Vartiokylän yläasteen kaikkien aikavälin mittaustulosten arvot. Mittaustuloksia oli aikavälillä yhteensä 52868 kappaletta.

Keskiarvo, persentiili ja vaihteluväli	Yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet
Mittausjakson suurin alipaine <b>-56,58 Pa</b>	<b>92,90 %</b> ajasta alipaineinen
Mittausjakson suurin ylipaine <b>41,41 Pa</b>	<b>7,10 %</b> ajasta ylipaineinen
99 % persentiili <b>5,56 Pa</b>	
1 % persentiili <b>-18,80 Pa</b>	
Mittausjakson keskiarvo <b>-7,15 Pa</b>	
Mittausjakson mediaani <b>-7,36 Pa</b>	

1 % persentiilistä voidaan nähdä, että rakennus on liian alipaineinen liian suurilla ajoilla. Toisaalta päiväaikaan ilmanvaihto muuttaa paine-erot ylipaineen puolelle varsinkin huoneen yläosassa.

### Kalasataman korttelitalo



**Kuva 6.6** Mittalaite H91 on huoneen yläreunassa 280 cm lattiasta ja H56 huoneen alareunassa 20 cm lattiasta. Harmaa alue kuvastaa lauantaita ja sunnuntaita.

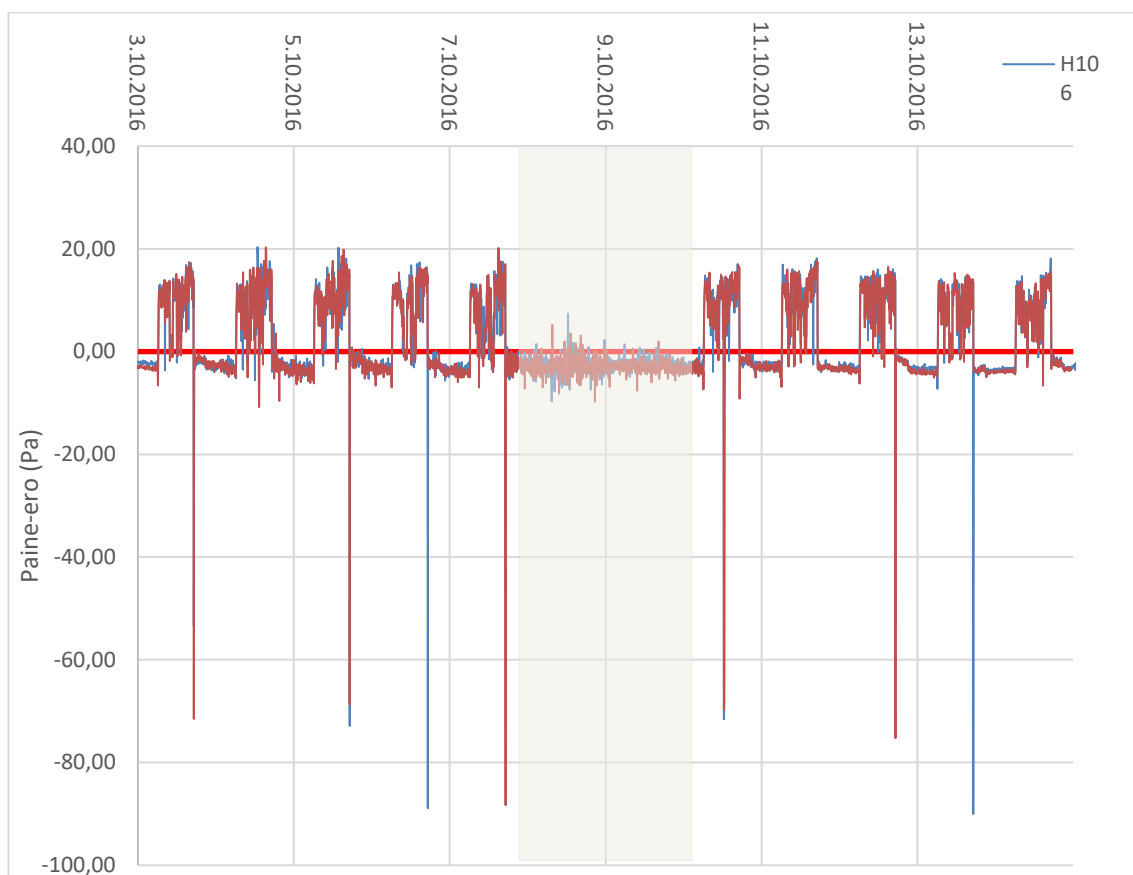
Kuvaajasta nähdään, että huone on liian alipaineinen. Suurimmat alipaineet ovat ilta- ja yöaikaan sekä viikonloppina.

**Taulukko 6.6** Kalasataman korttelitalon kaikkien aikavälin mittaustulosten arvot. Mittaustuloksia oli aikavälillä yhteensä 65510 kappaletta.

Keskiarvo, persentiili ja vaihteluväli	Yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet
Mittausjakson suurin alipaine <b>-100,43 Pa</b>	<b>92,02 %</b> ajasta alipaineinen
Mittausjakson suurin ylipaine <b>41,06 Pa</b>	<b>7,91 %</b> ajasta ylipaineinen
99 % persentiili <b>3,14 Pa</b>	
1 % persentiili <b>-22,43 Pa</b>	
Mittausjakson keskiarvo <b>-7,51 Pa</b>	
Mittausjakson mediaani <b>-7,38 Pa</b>	

Rakennuksessa on selkeästi ongelmia liian suurten alipaineiden kanssa.

### Korttelitalo Kanava



**Kuva 6.7** Mittalaite H106 on huoneen yläreunassa 259 cm lattiasta ja H115 huoneen alareunassa 20 cm lattiasta. Harmaa alue kuvastaa lauantaita ja sunnuntaita.

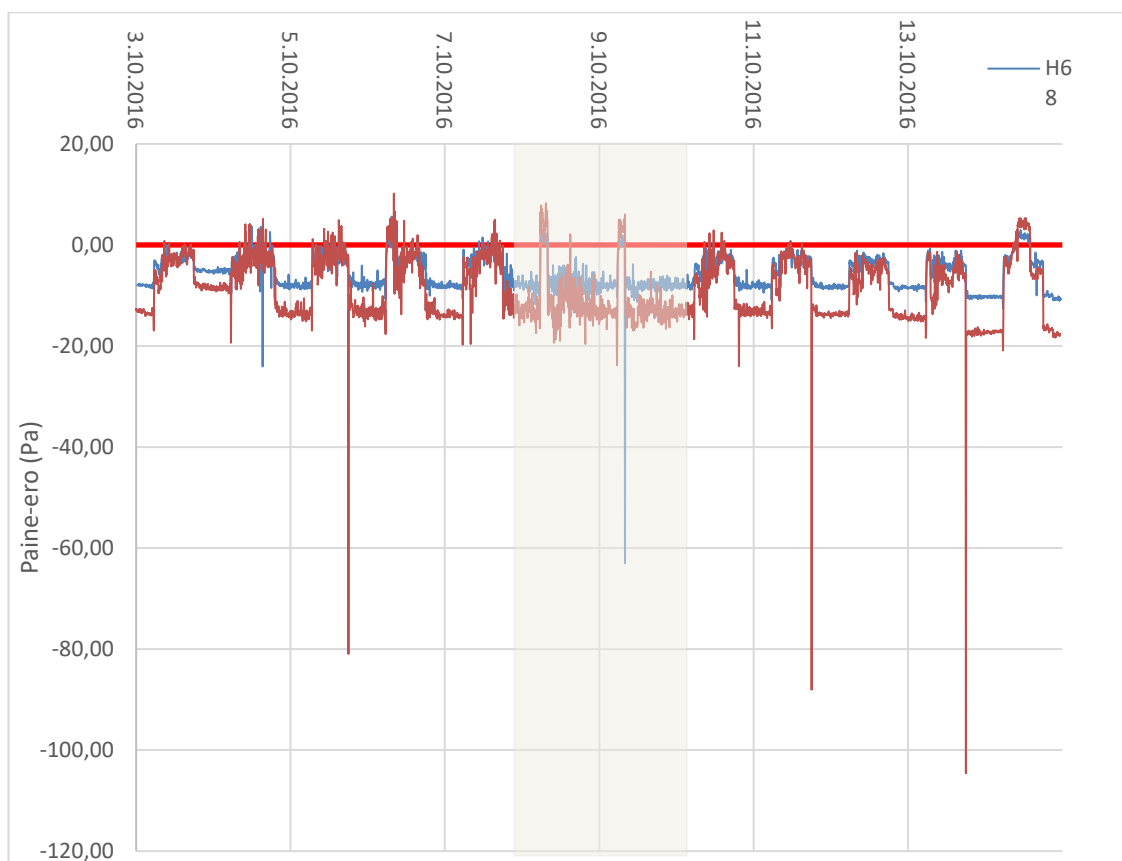
Suuret alipaineiikkit esiintyvät noin klo 17:13 iltä- ja yöaikaan sekä viikonloppuna. Viikonloppuna on selkeästi huomattavissa ilmanvaihdon määrän aleneminen vuorokautisen käytön vähentyessä.

**Taulukko 6.7** Korttelitalo Kanavan kaikkien aikavälin mittaustulosten arvot. Mittaustuloksia oli aikavälillä yhteensä 66793 kappaletta.

Keskiarvo, persentiili ja vaihteluväli	Yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet
Mittausjakson suurin alipaine <b>-101,95 Pa</b>	<b>65,36 %</b> ajasta alipaineinen
Mittausjakson suurin ylipaine <b>121,36 Pa</b>	<b>34,43 %</b> ajasta ylipaineinen
99 % persentiili <b>16,00 Pa</b>	
1 % persentiili <b>-13,67 Pa</b>	
Mittausjakson keskiarvo <b>0,48 Pa</b>	
Mittausjakson mediaani <b>-2,18 Pa</b>	

Rakennuksen alipaine on maltillisella tasolla yksittäisiä alipaineiikkejä lukuunottamatta. Kuitenkin koko mittausjakson keskiarvo on ylipaineen puolella, mikä ei ole tavanomaista.

### Kulosaaren korttelitalo



**Kuva 6.8** Mittalaite H68 on huoneen yläreunassa 297 cm lattiasta ja H59 huoneen alareunassa 20 cm lattiasta. Harmaa alue kuvastaa lauantaita ja sunnuntaita.

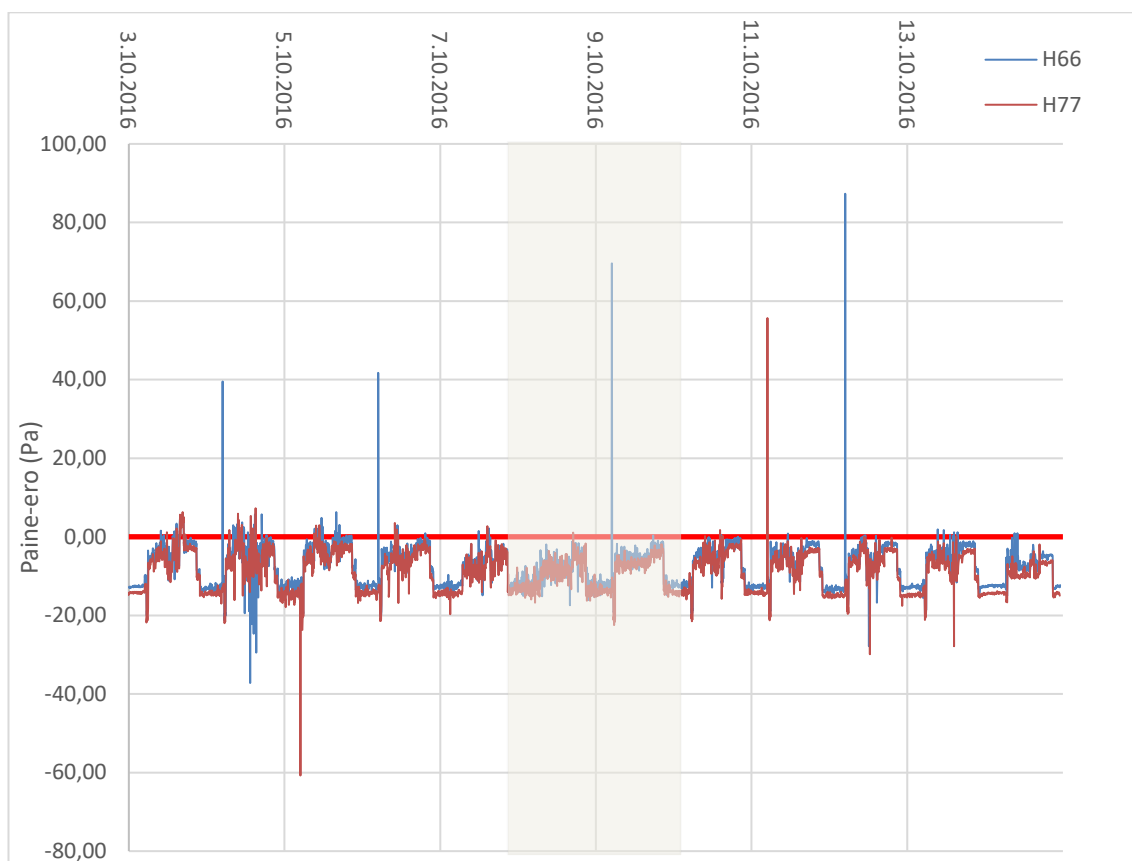
Suuret alipainepiikit tapahtuvat kello 18:00.

**Taulukko 6.8** Kulosaaren Korttelitalo kaikkien aikavälin mittaustulosten arvot. Mittaustuloksia oli aikavälillä yhteensä 66598 kappaletta.

Keskiarvo, persentiili ja vaihteluväli	Yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet
Mittausjakson suurin alipaine <b>-150,37 Pa</b> Mittausjakson suurin ylipaine <b>62,34 Pa</b> 99 % persentiili <b>3,78 Pa</b> 1 % persentiili <b>-24,24 Pa</b> Mittausjakson keskiarvo <b>-7,36 Pa</b> Mittausjakson mediaani <b>-6,32 Pa</b>	<b>93,66 %</b> ajasta alipaineinen <b>6,34 %</b> ajasta ylipaineinen

1 % persentiilistä nähdään, että kohde on liian alipaineinen liian pitkiä aikoja.

### Lpk Omenapuisto



**Kuva 6.9** Mittalaite H66 on huoneen yläreunassa 261 cm lattiasta ja H77 huoneen alareunassa 20 cm lattiasta. Harmaa alue kuvastaa lauantaita ja sunnuntaita.

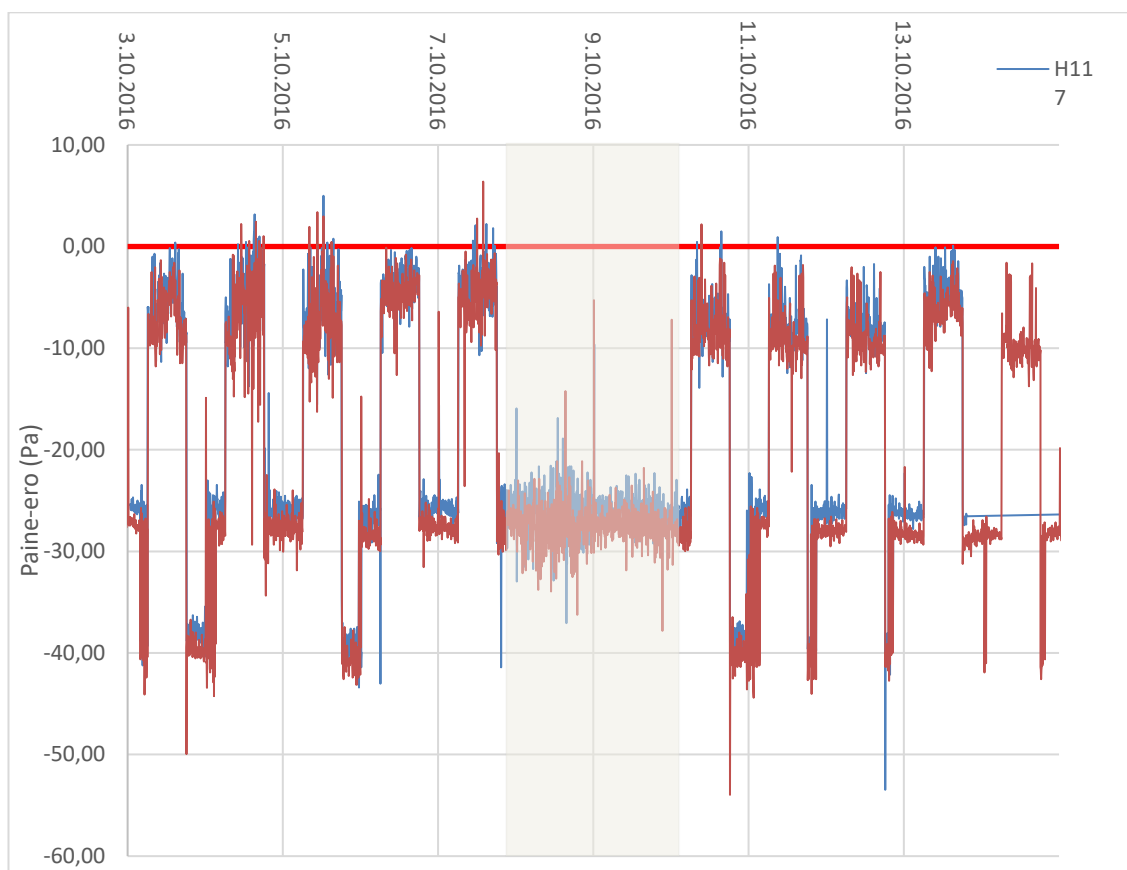
Suuret ylipainepeikit tapahtuvat noin kello 4:50.

**Taulukko 6.9** Kulosaaren Korttelitalo kaikkien aikavälin mittaustulosten arvot. Mittaustuloksia oli aikavälillä yhteensä 66598 kappaletta.

Keskiarvo, persentiili ja vaihteluväli	Yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet
Mittausjakson suurin alipaine <b>-83,68 Pa</b> Mittausjakson suurin ylipaine <b>87,31 Pa</b> 99 % persentiili <b>3,87 Pa</b> 1 % persentiili <b>-17,25 Pa</b> Mittausjakson keskiarvo <b>-6,65 Pa</b> Mittausjakson mediaani <b>-6,35 Pa</b>	<b>91,75 %</b> ajasta alipaineinen <b>8,25 %</b> ajasta ylipaineinen

1 % persentiilistä nähdään, että kohde on liian alipaineinen liian pitkiä aikoja.

### Lpk Ruskeasuo



**Kuva 6.10** Mittalaite H117 on huoneen yläreunassa 226 cm lattiasta ja H44 huoneen alareunassa 20 cm lattiasta. Harmaa alue kuvastaa lauantaita ja sunnuntaita.

Kohteessa painesuhteiden muutokset ovat erittäin suuria. Tämän lisäksi tilassa on voimakas alipaine ilta- ja yöaikaan sekä viikonloppuna.

**Taulukko 6.10** Lpk Ruskeasuo kaikkien aikavälin mittaustulosten arvot. Mittaustuloksia oli aikavälillä yhteensä 69688 kappaletta.

Keskiarvo, persentiili ja vaihteluväli	Yli- ja alipaineen suhteelliset osuudet
Mittausjakson suurin alipaine <b>-88,14 Pa</b>	<b>97,78 %</b> ajasta alipaineinen
Mittausjakson suurin ylipaine <b>17,69 Pa</b>	<b>2,17 %</b> ajasta ylipaineinen
99 % persentiili <b>1,73 Pa</b>	
1 % persentiili <b>-40,85 Pa</b>	
Mittausjakson keskiarvo <b>-20,45 Pa</b>	
Mittausjakson mediaani <b>-25,80 Pa</b>	

Taulukon tuloksista nähdään, että kohde on selvästi liian alipaineinen.

## 7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Rakennusten sisäilman olosuhdemittaukset ovat kokonaisuudessaan laaja ja haastava tehtävä. Haasteellisuutta lisää saatujen tulosten analysointi ja todettujen ongelmakohtien syiden selvittäminen. Sisäilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden, hiilidioksidin ja radonpitoisuuden määrittäminen on usein suoraviivainen ja selkeämpi kokonaisuus olosuhdemittauksissa. Sen sijaan paine-erojen mittaamisessa ja erityisesti suurien muutosten syiden selvittäminen on käytännössä aina hankalaa.

Laajamittainen sisäilman painesuhteiden mittaaminen vaatii laitteistohankinnoilta ja -asennuksilta paljon. Ennen asennuksia tapahtuva laitteiston kokoaminen ja käyttökuntoon saattaminen on pitkän aikavälin työtä. Tarkoituksenmukaisten ja hintatasoltaan maltillisten antureiden löytäminen ja yhteensovittaminen on keskeinen ongelma mittalaittekokonaisuudessa.

Asennustyö kohteissa vaatii aikaa ja ennakkosuunnittelua. Mittalaitteiden asennuspaikkojen löytäminen tarvittavine virtalähdepaikkoineen osoittautui erittäin haastavaksi. Kohteisiin asennettujen laitteiden asennustyö kesti noin 0,5 työpäivää/kohde.

Paine-erojen tulosten analyysissä ei yleensä voida täysin selvittää, mikä mahdollisia suuria paine-eroja tai merkittäviä yli-/alipaineita aiheuttaa. Tämä johtuu siitä, että painesuhteiden vaihtelut ovat niin suuresti riippuvaisia rakennuksen käyttötarkoituksesta ja käyttäjien käyttötottumuksista. Näin ollen laajat ja yksityiskohtaiset mitoitukset vaativat paitsi sisäilman olosuhteiden mitoitusta, myös rakennuksen itsensä käyttöön liittyviä tutkimuksia. Tällaisia tutkimuksia voisi olla esimerkiksi ikkunoiden ja ulko-ovien avaamisen ja avoimena pitämisen määrittäminen jonkinlaisella liiketunnistintekniikalla. Tämän lisäksi tulisi määrittää rakennuksen normaalikäytöstä poikkeavat käyttäjämäärät erilaisilla kulkulaskureilla oviaukoissa. Näin saataisiin parempaa reaaliaikaista dataa esimerkiksi sisäilman kohonneiden hiilidioksiditasojen syistä. Tällöin voitaisiin vetää jonkinlaisia johtopäätöksiä siitä, että onko hiilidioksidin lisäyksen taustalla rakennuksen käytön lisääntyminen ja/vai esimerkiksi jonkinlainen puute ilmanvaihdoissa. Käytännössä edellä mainittujen, tarkkoihin analyysihin johtavien mittausten suorittaminen kohteissa on mahdollonta tutkimuksen kannalta merkittävässä otoskoossa.

Tässä diplomityössä esitetty sisäilman olosuhteiden mittaamisen kokonaisuus ja edelleen COMBI-hanke on Suomessa ja maailmalla ainutlaatuinen. Kirjallisuudessa on hyvin vähän vastaavan otoskoon ja/tai mittausajanjakson tutkimuksia. Käytännössä vastaavat tutkimukset ja niiden tulokset rajoittuvat joko tutkittavien kohteiden määrän tai olosuhteiden mittaamisen ajanjakson pituuden suhteen huomattavasti suppeampaan kokonaisuuteen. COMBI-hankkeesta saatava mittausdata on huomattavasti käyttökelpoisempaa ja rakennuksia sekä niiden käyttöä kuvaavampaa, kuin esimerkiksi lämpökuvauksien tai vaipan





ja oikeanlaisten säätöjen tekeminen on erittäin tärkeää kelvollisen ja terveellisen sisäilman laadun takaamiseksi. Nykyaikaisten rakennusten ilmanvaihdon alipaineiseksi suunnitteleminen saattaa johtaa liian suuriin alipaineisiin rakennusten sisällä. Toisaalta myös puutteellinen ilmanvaihdon säätö voi aiheuttaa liian suuria ali- tai ylipaineita.

## LÄHTEET

- Chandra-observatorio (2016), internetsivut, Harvardin yliopisto, Yhdysvallat.  
[http://chandra.harvard.edu/resources/em\\_radiation.html](http://chandra.harvard.edu/resources/em_radiation.html), viitattu 24.11.2016
- CO<sub>2</sub>-raportti.fi, internetsivut (2016), [http://www.co2-raportti.fi/?page=tietoa\\_raportista](http://www.co2-raportti.fi/?page=tietoa_raportista), viitattu 27.11.2016.
- Comark Instruments (2016), Comark N2003 Diligence EV Temperature and Humidity Data Logger, tekninen tietolehtinen. <http://www.impex.no/Portals/0/EV%20data-loggere.pdf>, viitattu 25.8.2016.
- D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma (2012), Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, Ympäristöministeriö.
- Hagentoft, Carl-Eric (2012), Introduction to Building Physics, Studentlitteratur AB, LUND, s.1, 4
- Hengitysliitto, internetsivut 2016. <http://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/hiukkasmaiset-ja-kaasumaiset-epapuhautudet/kuiva-ja-kostea-ilma>, viitattu 22.11.2016.
- Laukkarinen, A. (2015), Tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa, Tampereen teknillinen yliopisto, diplomityö, s.12-15, 20
- Katainen, V., Vähämaa, K. (2015), 'Paine-erojen pitkäaikainen seuranta ja painesuhteiden vaihtelu rakennuksissa', Rakennusterveys, opinnäytetyöt, Itä-Suomen yliopisto. 103 s.
- Kattoliitto (2013), 'Toimivat katot 2013', tekninen julkaisu, Kattoliitto ry. 116 s.
- Korkeamäki, T. (2010), 'Rakennusfysiikkaa lämpökuvaajille', Kosteus, luentomateriaali, saatavilla: <http://www.kuntoarviot.net/files/8047.pdf>, viitattu 10.9.2016
- Päiväkotien sisäilmatutkimus, raportti 2.4.2012, LVI-talotekniikkateollisuus ry, Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Mikkelin ammattikorkeakoulu, Tampereen ammattikorkeakoulu, Satakunnan ammattikorkeakoulu, Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- Päkkilä, T. (2012), 'Mikrobien kulkeutuminen sisäilmaan paine-eron vaikutuksesta', diplomityö, Insinööritieteiden korkeakoulu, Aalto-Yliopisto. 148 s. + 62 liites.

- Rakennusteollisuus (2015). 'Rakennusten energiatehokkuutta ohjaavat direktiivit'.  
<https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Ilmasto--ja-energiapolitiikka/Energiatehokkuus-suunnitteluvaiheessa/>, viitattu 14.1.2016.
- Reinikainen, E., Loisa, L., Tyni, A. (2015), FInZEB- hanke, loppuraportti 31.3.2015, Rakennusteollisuus RT ry, Talotekniikkateollisuus ry, Ympäristöministeriö.
- RIL 107-2012, Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- RIL 201-1-2011, Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- RIL 255-1-2014, Rakennusfysiikka 1: Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Rotronic (2016), Rotronic Hygrolog HL-NT2- dataloggerin tekninen tietolehtinen.  
<http://www.rotronic.com/en/humidity-measurement-feuchtemessung-temperatur-messung/humidity-measurement-feuchte-messung/humidity-data-loggers-daten-logger/hygrolog-hl-nt-data-logger/hygrolog-hl-nt2.html>, viitattu 25.8.2016
- Saxholm, S., Rantanen, M. (2011), 'Paineen mittaust'. Mittatekniikan keskus. Julkaisu J1/2011, s.5-8.
- Seppänen, K. (2010), 'Painesuhteet rakennuksen ulkovaipan yli', Aducate reports and books, Itä-Suomen yliopisto. 42 s.
- STUK, Säteilyturvakeskus (2016), internetsivut, viitattu 27.11.2016.
- Techmark (2017), internetsivut, viitattu 24.4.2017.
- TTY, Rakennusfysiikan laitos (2016), COMBI- hankkeen verkkosivut.  
<http://www.tut.fi/fi/tietoa-yliopistosta/laitokset/rakennustekniikka/tutkimus/rakennetekniikka/rakennusfysiikka/combi/index.htm>, viitattu 26.8.2016
- EPA, US Environmental Protection Agency, (2016), 'Carbon Dioxide as a Fire Suppressant: Examining the Risks: Appendices', liite B, saatavilla:  
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/co2appendixb.pdf>, viitattu 27.11.2016.
- Vaisala, internetsivut (2016). <http://www.vaisala.fi/fi/Pages/default.aspx>, viitattu 27.11.2016
- Vinha, J., (2009), luentomateriaali, rakennusterveysasiantuntijakoulutus, Kuopio 11.12.2009.

- Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A., Käkelä, P., (2005), 'Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona', Tutkimusraportti 129, Talonrakennustekniikan laboratorio, Tampereen teknillinen yliopisto. 101 s. + 211 liites.
- Vornanen-Winqvist, C., Mattila, M., Lignell, U., Hildén, S., Tuomi, T., Salonen, H., (2015), seminaariesitelmä 'Sisäilmaongelmat julkisissa uudisrakennuksissa', Aalto-yliopisto, Vantaan kaupunki, Helsingin kiinteistöviraston tilakeskus, Työterveyslaitos, Rakennusfysiikkaseminaari 2015, Tampere.
- Weckström, T. (2005), 'Lämpötilan mittaus'. Mittatekniikan keskus. Julkaisu J1/2005. 99 s. + 5 liites.

## LIITE 1: ANTUREIDEN (VAISALA, BECK) VERTAILUMITTAUKSET

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	10.2.2015							
3				Vertailu				
4								
5		Vaisala	PDT101-W4C		Furness Control	FCO-16		
6		SN:	507231058		SN:	0006042		
7								
8								
9			Pa:		Pa:		Ero(Pa):	
10			-42,566		-42,75491		-0,18891	
11			-32,63775		-32,57505		0,0627	
12			-20,61509		-20,65762		-0,04253	
13			-11,71622		-11,78252		-0,0663	
14			-0,86034		-1,049019		-0,18868	
15			13,03542		13,2149		0,17948	
16			20,53216		20,52966		-0,0025	
17			33,73456		33,97932		0,24476	
18			42,44980		42,48762		0,03782	
19			58,70242		59,15567		0,45325	
20			43,32373		43,77123		0,4475	
21			33,96788		33,85808		-0,1098	
22			24,08555		24,66999		0,58444	
23			11,91707		11,54397		-0,3731	
24			0,366207		0,3578169		-0,00839	
25			-11,63692		-11,34137		0,29555	
26			-24,43883		-24,66749		-0,22866	
27			-32,59672		-32,65037		-0,05365	
28			-42,62237		-42,60188		0,02049	
29								
30							0,58444	Max
31							-0,3731	Min
32								
33								
34								
35								

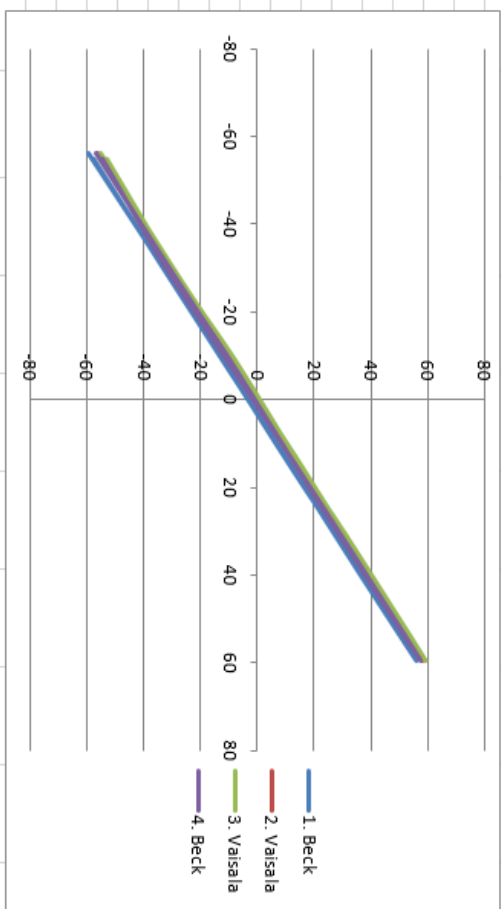
**Kuva 2.** Vaisala PDT101-W4C- anturin vertailumittauksen tulokset verrattuna Furness FCO-16- tarkkuusmittarin tuloksiin.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	11.2.2016			Combi1						
3			Raw	sn			Offset null			
4		507231058	vaisala	beck	10029101003		Vaisala	beck		Difference
5		Offset	0,063782	-1,17822						
6			-57,71	-59,48			-57,7738	-60,6582		2,884434
7			-47,01	-48,66			-47,0738	-49,8382		2,764434
8			-38,53	-39,74			-38,5938	-40,9182		2,324434
9			-29,31	-30,17			-29,3738	-31,3482		1,974434
10			-18,05	-19,35			-18,1138	-20,5282		2,414434
11			-9,8	-11,49			-9,86378	-12,6682		2,804434
12			-0,503	-1,75			-0,56678	-2,92822		2,361434
13			11	9,69			10,93622	10,86822		0,068001
14			21,51	20,16			21,44622	21,33822		0,108001
15			31,48	30,16			31,41622	31,33822		0,078001
16			41,7	40,59			41,63622	41,76822		-0,132
17			50,57	49,17			50,50622	50,34822		0,158001
18			60,13	58,73			60,06622	59,90822		0,158001
19			50,49	48,85			50,42622	50,02822		0,398001
20			41,53	40,02			41,46622	41,19822		0,268001
21			31,37	29,88			31,30622	31,05822		0,248001
22			21,26	20,02			21,19622	21,19822		-0,002
23			10,68	9,38			10,61622	10,55822		0,058001
24			0,104	-1,004			0,040218	-2,18222		2,222434
25			-10,83	-12,21			-10,8938	-13,3882		2,494434
26			-20,21	-21,74			-20,2738	-22,9182		2,644434
27			-29,35	-30,67			-29,4138	-31,8482		2,434434
28			-40,68	-41,95			-40,7438	-43,1282		2,384434
29			-49,43	-50,001			-49,4938	-51,1792		1,685434
30			-56,99	-58,51			-57,0538	-59,6882		2,634434
31										
32										
33										
34										
35										

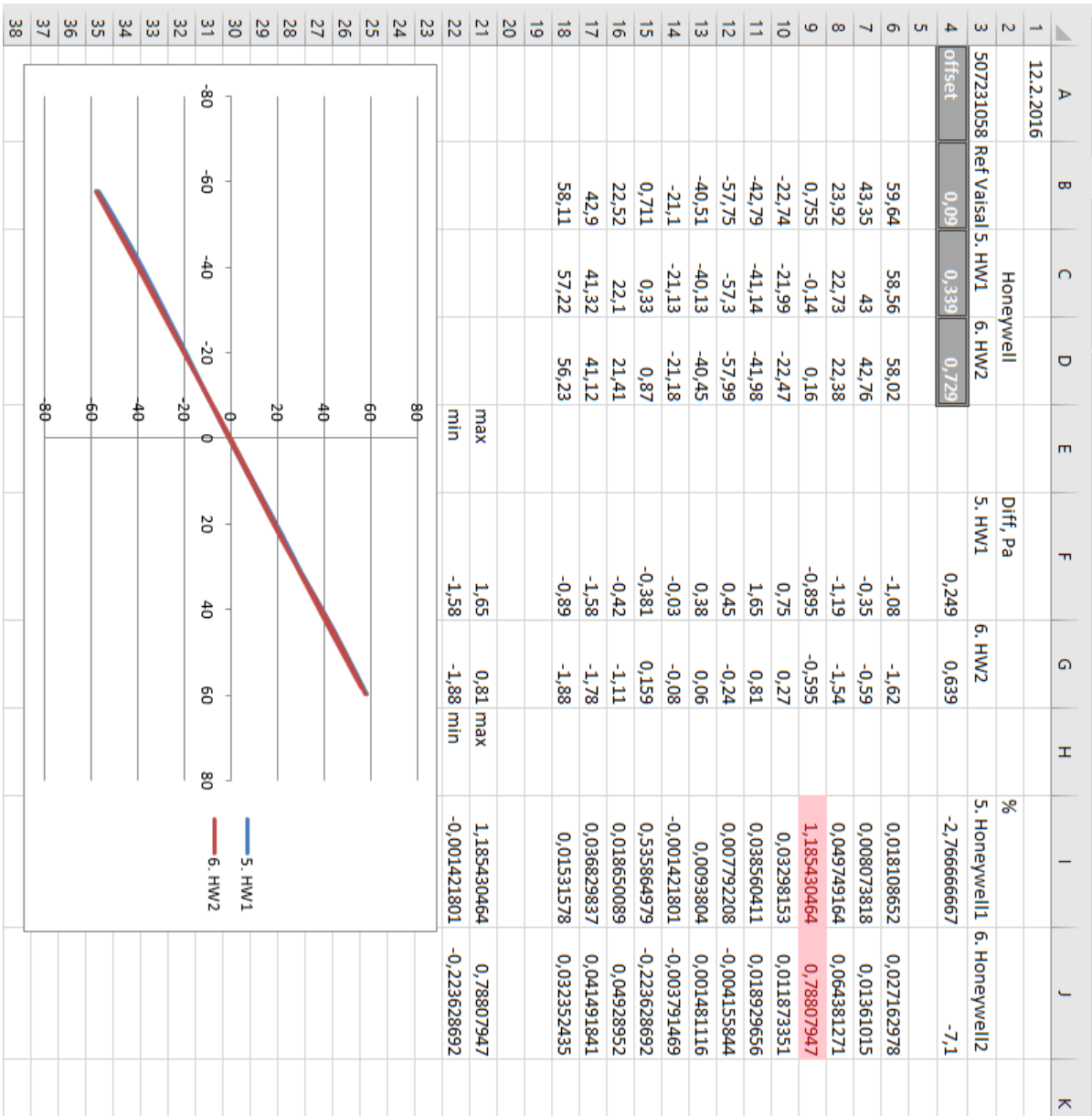
*Kuva 3. Antureiden (Vaisala, Beck) vertailumittaukset.*

## LIITE 2: KALIBROINTIEN TULOKSET

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	11.2.2016															
2	(ref)		combi1	combi2	combi3	combi4		Rel to ref, Pa					Rel to ref, %			
3	507231058 Vaisala	1. Beck	2. Vaisala	3. Vaisala	4. Beck			1. Beck	2. Vaisala	3. Vaisala	4. Beck		1. Beck	2. Vaisala	3. Vaisala	4. Beck
4	offset	0,087	-3,27	0,47	0,37	0,57		-3,357	0,383	0,283	0,483		38,58621	-4,4023	-3,25287	-5,55172
5																
6		-54,8	-57,92	-54,66	-53,22	-54,44		-3,12	0,14	1,58	0,36		-0,05693	0,002555	0,028832	0,006569
7		-30,9	-34,34	-31,82	-31,1	-32,85		-3,44	-0,92	-0,2	-1,95		-0,11133	-0,02977	-0,00647	-0,06311
8		-6,25	-9,77	-6,99	-6,36	-7,84		-3,52	-0,74	-0,11	-1,59		-0,5632	-0,1184	-0,0176	-0,2544
9		11,77	8,43	10,94	12,05	10,4		-3,34	-0,83	0,28	-1,37		0,283772	0,070518	-0,02379	0,116398
10		35,47	31,7	34,46	35,19	34,119		-3,77	-1,01	-0,28	-1,351		0,106287	0,028475	0,007894	0,038089
11		59,52	55,91	58,1	59,21	57,63		-3,61	-1,42	-0,31	-1,89		0,060652	0,023858	0,005208	0,031754
12		33,37	30	32,67	33,55	31,53		-3,37	-0,7	0,18	-1,84		0,100989	0,020977	-0,00539	0,055139
13		16,05	12,3	15	15,97	14,53		-3,75	-1,05	-0,08	-1,52		0,233645	0,065421	0,004984	0,094704
14		-8	-11,41	-8,32	-7,06	-8,6		-3,41	-0,32	0,94	-0,6		-0,42625	-0,04	0,1175	-0,075
15		-26,47	-29,76	-27,1	-26,38	-27,41		-3,29	-0,63	0,09	-0,94		-0,12429	-0,0238	0,0034	-0,03551
16		-56,1	-59,76	-56,27	-55,41	-56,72		-3,66	-0,17	0,69	-0,62		-0,06524	-0,00303	0,012299	-0,01105
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27																
28																
29																
30																
31																
32																
33																
34																
35																
36																
37																



Kuva 4. Ensimmäinen kalibrointi ja antureiden tarkistus (Vaisala, Beck).



Kuva 5. Toisen kalibroinnin ja tarkistuksen tulokset (Honeywell).



**RT CL11 2160106**  
11.10.16 klo 9.44

**Huonekorkeus: 241 cm**  
- H70 ylhäällä 10 cm katosta to 28.7.16 klo 16.00  
- H103 alhaalla 20 cm lattiasta to 28.7.16 klo 16.10

**RT CL11 2160118**  
11.10.16 klo 9.40

**Tiloja jakava väliseinä**  
Ei näy kuvissa!

**RT CL11 2160167**  
11.10.16 klo 9.41

**Comark 08010127**  
to 28.7.16 klo 16.45

**Huonekorkeus: 242 cm**  
- H72 ylhäällä 5 cm katosta to 28.7.16 klo 15.40  
- H73 alhaalla 20 cm lattiasta to 28.7.16 klo 15.50

**Comark 05020216**  
to 28.7.16 klo 16.40

**LPK Ruskeasuon k**  
pääväkoti  
Paraistentie 9, 00500  
1. KERROS

RT CL11 2160115  
11.10.16 klo 10.20

Comark 05020230  
to 28.7.16 klo 10.05

Comark 05020374  
to 28.7.16 klo 10.00

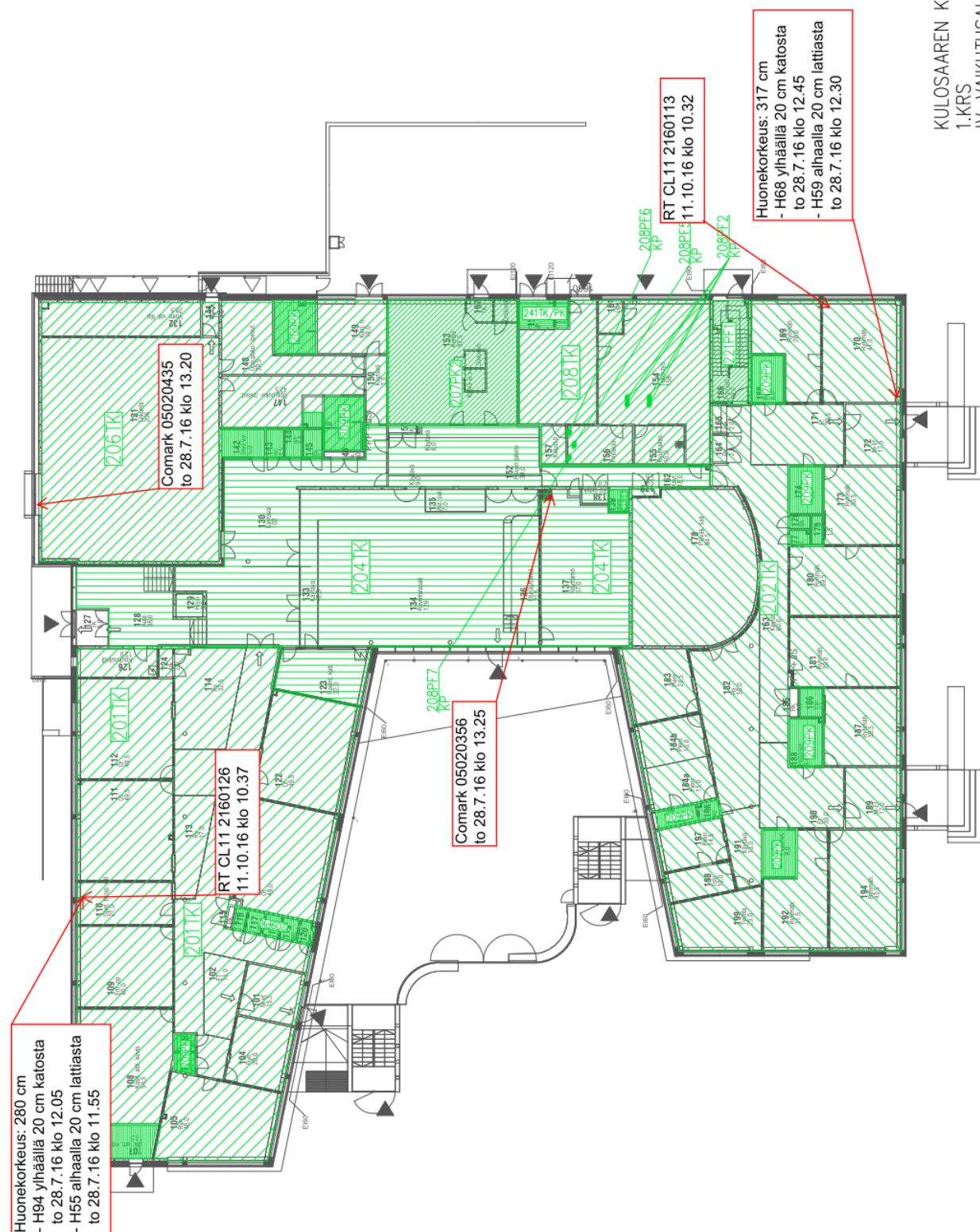
RT CL11 2160164  
11.10.16 klo 10.15

Huonekorkeus: 300 cm  
- H91 ylhäällä 20 cm katosta  
to 28.7.16 klo 8.30  
- H56 alhaalla 20 cm lattiasta  
to 28.7.16 klo 8.45

Huonekorkeus: 330 cm  
- H93 ylhäällä 25 cm katosta  
to 287.16 klo 9.45  
- H57 alhaalla 20 cm lattiasta  
to 287.16 klo 9.30

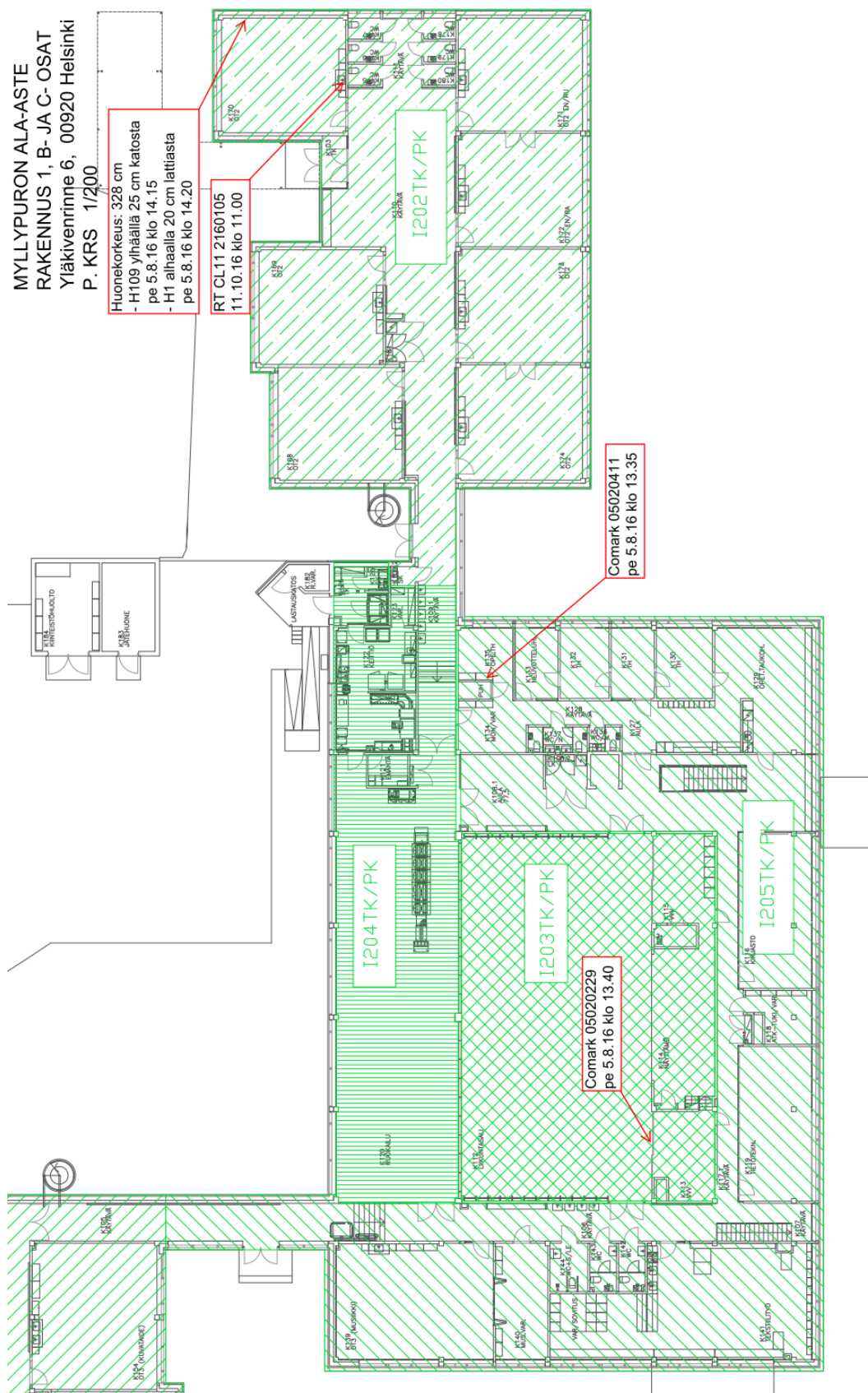


# Kulosaaren korttelitalo



# Myllypuron ala-aste

Rakennus 1, B- ja C-osat. P.krs.



# Myllypuron ala-aste

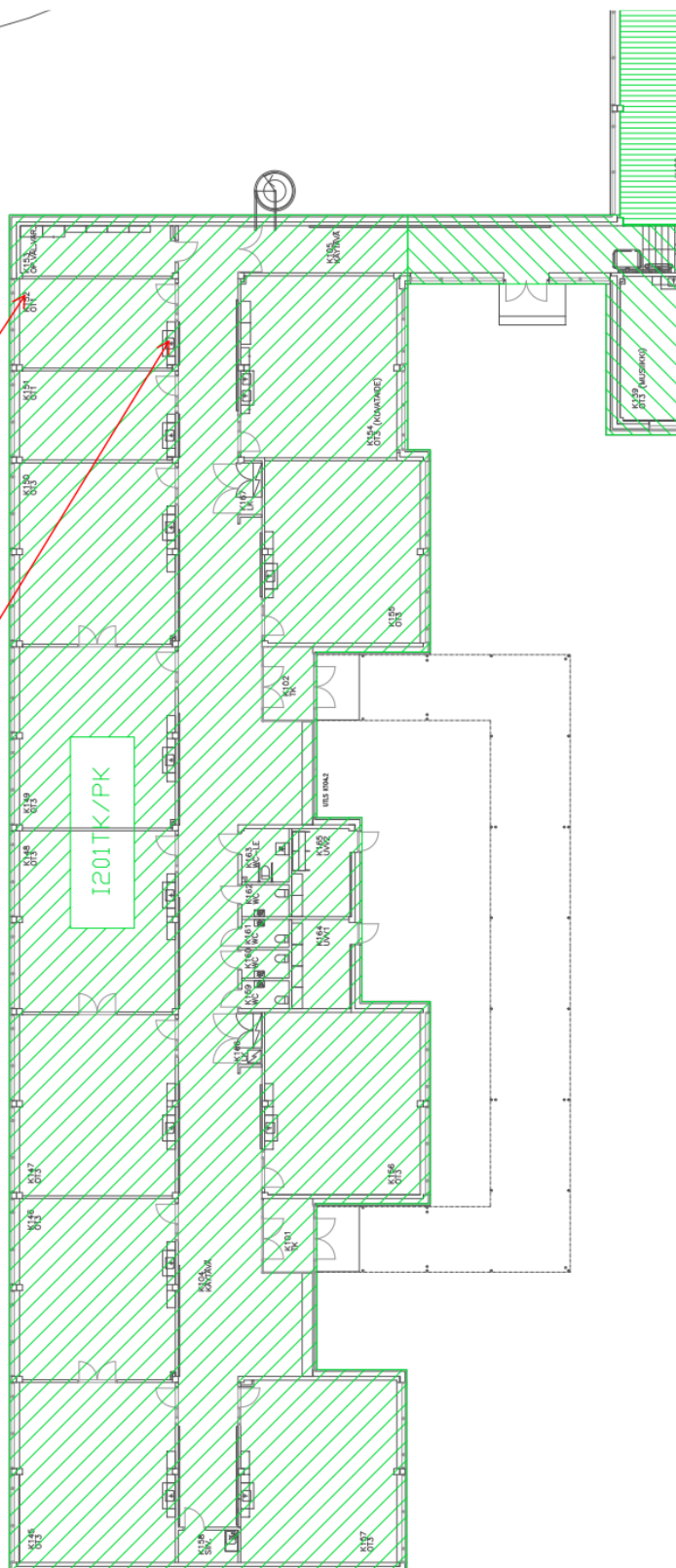
Rakennus 1, A-osa. P.krs.

MYLLYPURON ALA-ASTE  
RAKENNUS 1, A-OSA  
Yläkivenrinne 6, 00920 Helsinki  
P. KRS 1/200

IV vaikutusalueet

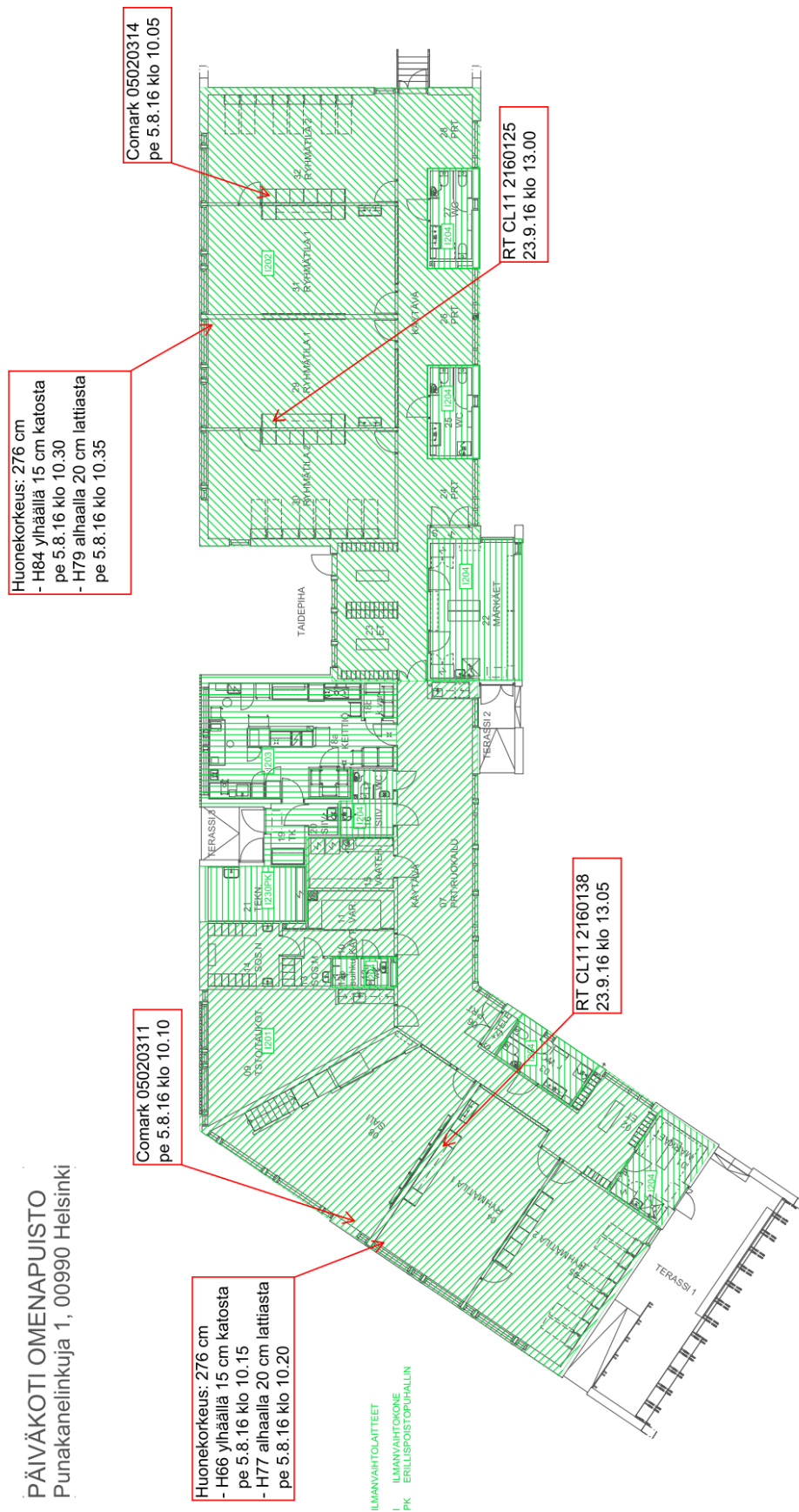
Huonekorkeus: 330 cm  
- H116 ylhäällä 10 cm katosta  
pe 5.8.16 klo 15.00  
- H112 alhaalla 25 cm lattiasta  
pe 5.8.16 klo 15.10

RT CL11 2160170  
11.10.16 klo 11.05

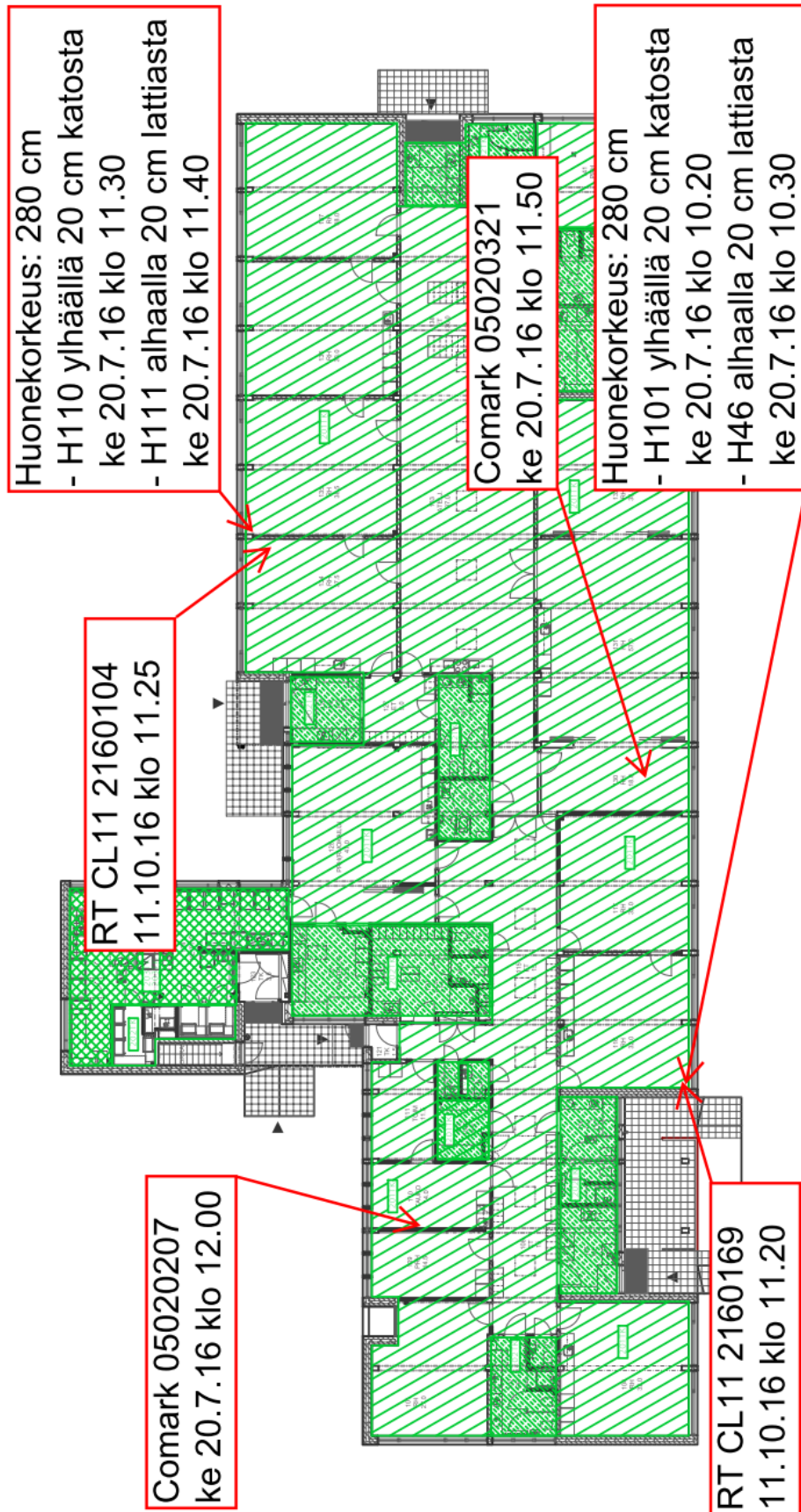




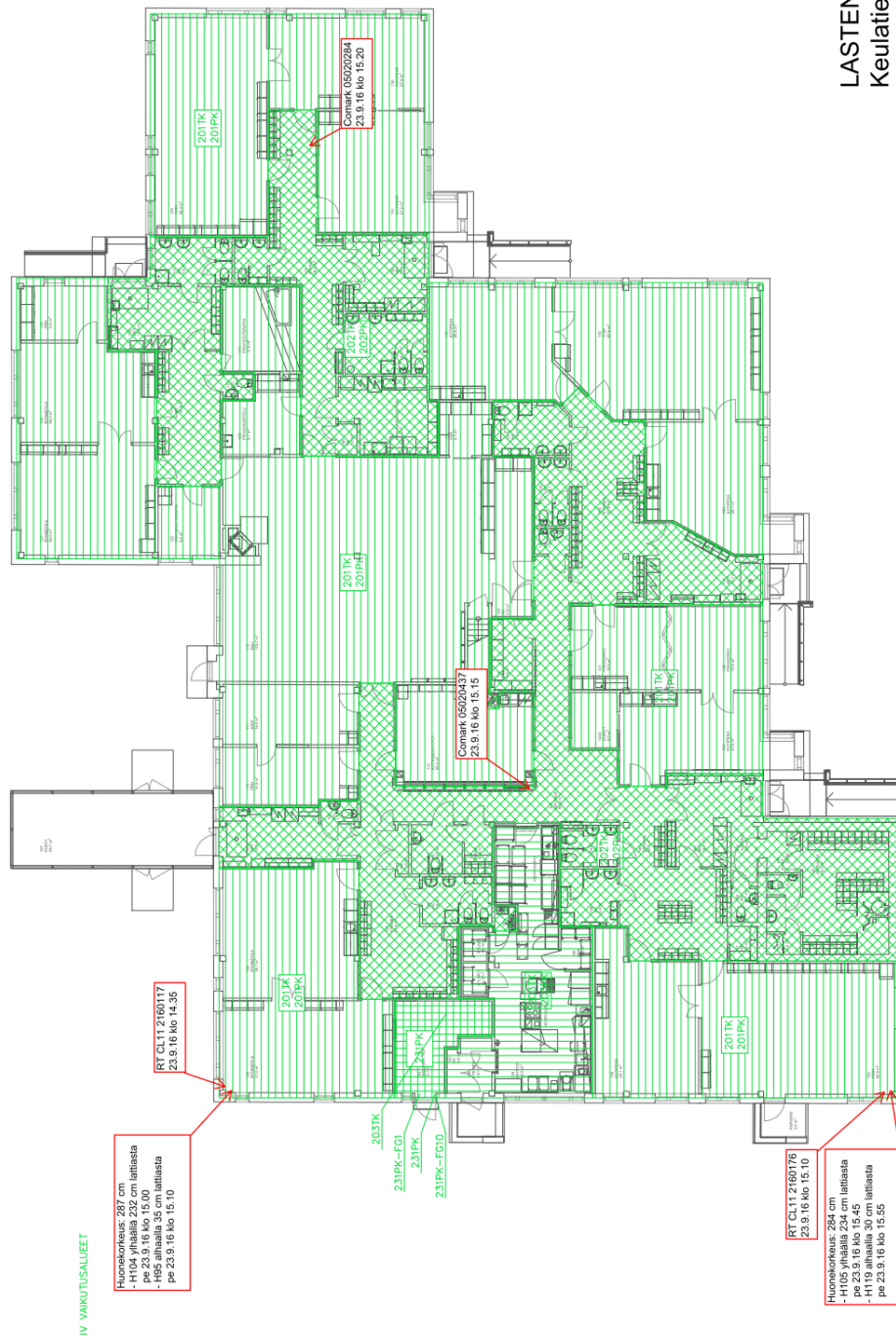
Lpk Omenapuisto



Lpk Sakara



Lpk Keula



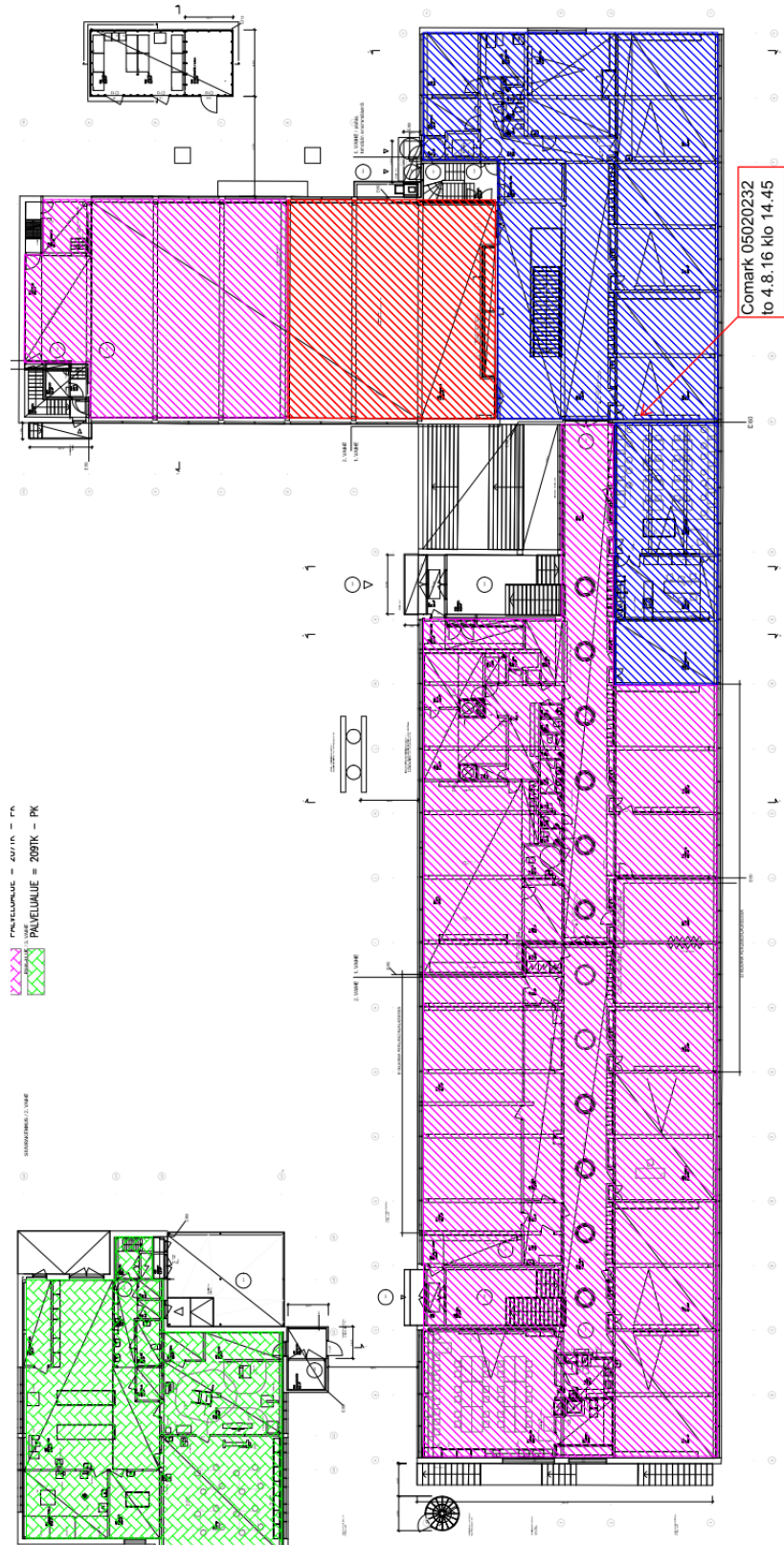
LASTEN PÄIVÄKOTI KEULA  
Keulatie 4, 00980 Helsinki  
1. Kerros 1:50  
IV-kojeiden vaikutusalueet





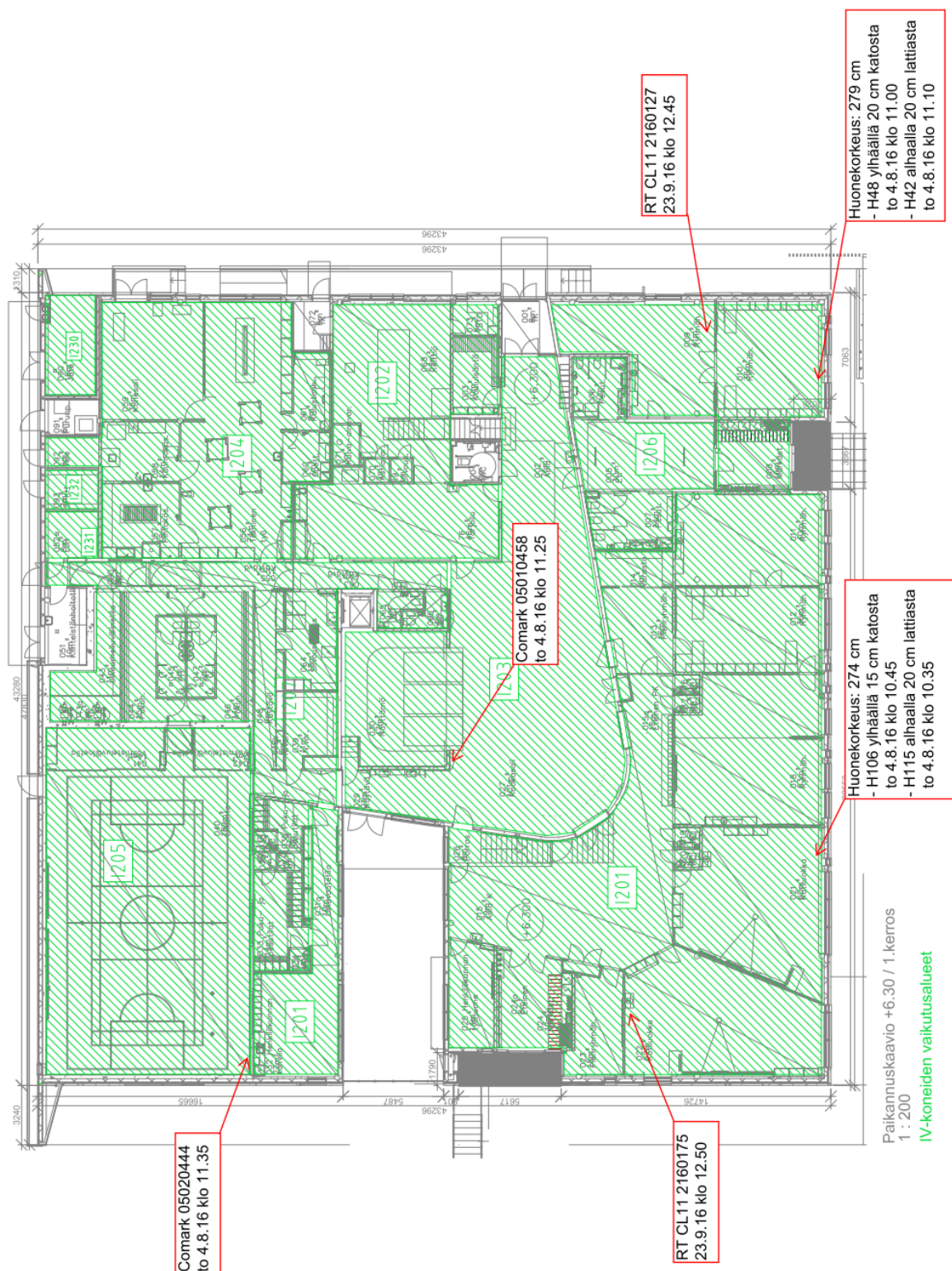
# Vartiokylän yläaste

## 2. kerros

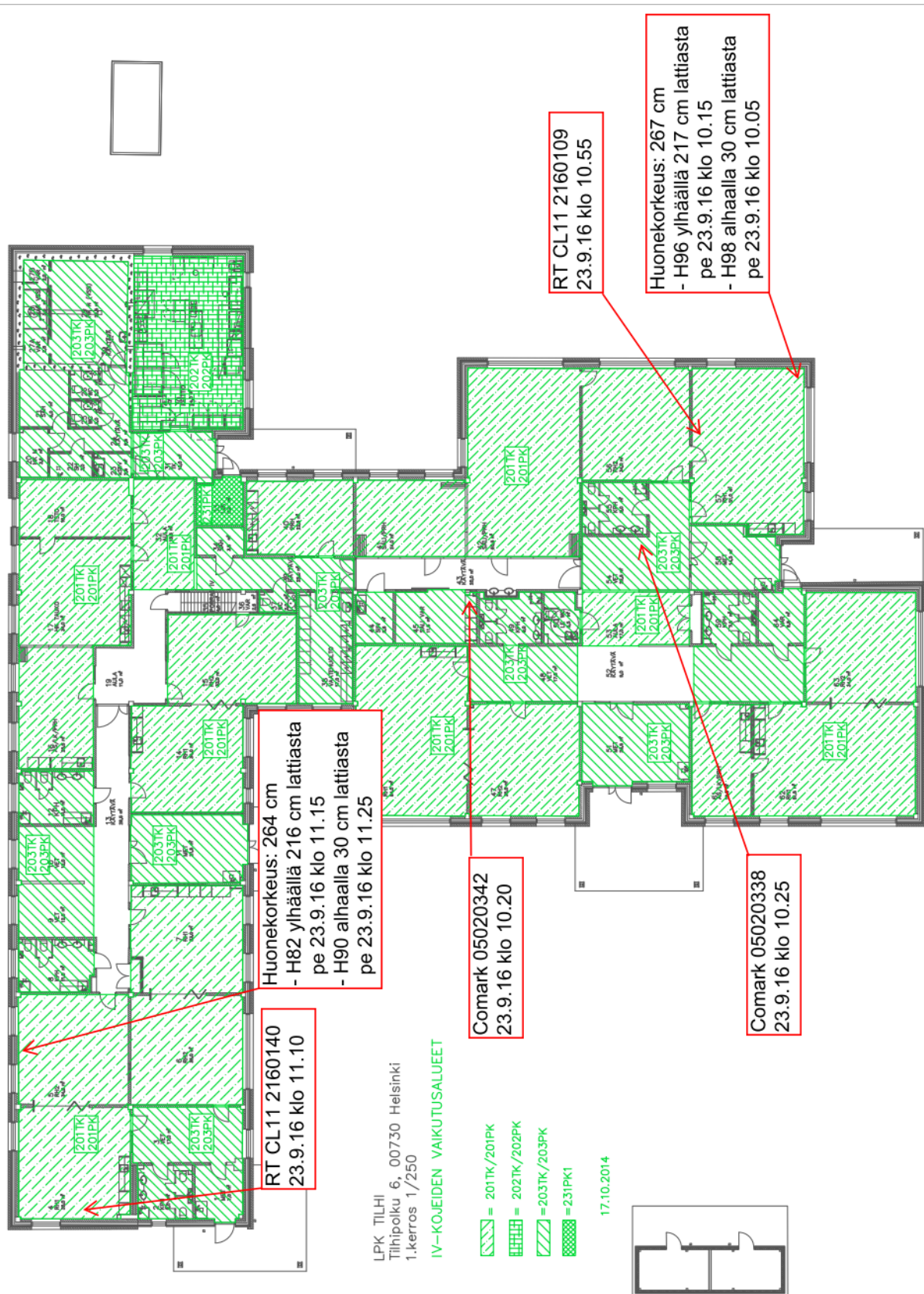




# Korttelitalo Kanava



# Lpk Tilhi





**LIITE 4: COMARK – MITTALAITTEEN TEKNISET TIEDOT**

Technical Specifications	
Sensor Type	Thermistor
Measurement Range N2001, N2011 N2002, N2012 Internal sensor External Sensor N2003, N2013 Temperature Humidity	 -40°C/-40°F to +70°C/+158°F  -40°C/-40°F to +70°C/+158°F -40°C/-40°F to +150°C/+302°F  -20°C/-4°F to +60°C/+140°F 0 to 97% RH non condensing
Scales Temperature Humidity	 °C or °F RH or DP
Display Resolution Temperature Humidity	 0.1° 0.1% RH
System Accuracy Temperature -25°C/-13°F to +50°C/+122°F -40°C/-40°F to +80°C/+176°F -40°C/-40°F to +150°C/+302°F Humidity -20°C/-4°F to +60°C/+140°F	  ±0.5°C/1°F ±1°C/2°F ±2°C/4°F (typical)  ±3% RH
Memory 32K 1 channel 2 channels 3 channels 4 channels 5 channels	 16,000 samples 8,000 samples 5,300 samples 4,000 samples 3,200 samples
Communications	via infra-red interface
Download Time	3 minutes for 10,000 readings (typical)
Logging Frequency	Programmable between 1 second and 99 hours
Internal Sensor Response Time	T <sub>90</sub> = 15 to 30 minutes in ambient air
Ambient Storage	-40°C/-40°F to +70°C/+158°F
Logging start	Programmable date and time or manual start from instrument multi-function button
Software	Windows™ based Evolution software requiring Windows 95, 98 or NT operating systems
Battery	1 x AA size 3.6V replaceable lithium battery, part number A17476
Battery Life	Up to 5 years
Case Material	ABS
Environmental Protection	IP67, EN60529, IEC529
LED Indication	Red = alarm, green = logger active
Dimensions	L 88mm/3.5" (including fixing lug) W 80mm/3.1" D 35mm/1.4"
Weight N2001 N2011 N2002 N2012 N2003 N2013	 95gms/3.5oz 103gms/3.6oz 111gms/3.9oz 119gms/4.2oz 109gms/3.9oz 117gms/4.1oz

**Kuva 6.** Lämpötila- ja RH- mittalaitteen tekniset tiedot (Comark N2003) (Comark Instruments, 2016).

**LIITE 5: ROTRONIC CL11 – MITTALAITTEEN TEKNISET TIEDOT**

<b>General</b>	
Parameters	CO <sub>2</sub> , relative humidity and temperature
Range of application	0...50 °C / 0...100 %RH, non-condensing
Power supply	Via AC1214 AC adapter (included in the delivery package)
IP protection	IP30
Clock	Real time clock with 2 min. battery backup
Alarm	Adjustable for CO <sub>2</sub> measurement
<b>Technical information/Functions</b>	
Current consumption	50 mA
Warm-up time	<1 min.
Memory capacity	40,000 values with time stamp, automatic recording (%RH / °C / CO <sub>2</sub> / external temperature probe)
<b>CO<sub>2</sub> measurement</b>	
Measurement principle	Non dispersive infrared (NDIR) with automatic baseline correction (ABC)
Measurement range	0...5,000 ppm
Accuracy at 23 °C ±5 K	±30 ppm ±5 % of the measured value
Resolution	1 ppm
Response time	<10 sec @ 30 cc/min. flow, <3 min diffusion time
Adjustment point	Automatic calibration, manual calibration at 400 ppm
Pressure dependence	+1.6 % reading per kPa
Null drift	<10 ppm/year
Maintenance	No maintenance (standard indoor application)
<b>Humidity measurement</b>	
Humidity sensor	ROTRONIC HYGROMER® IN-1
Measurement range	0...100 %RH
Accuracy at 23 °C ±5 K	±3 %RH (10...90 %RH)
Resolution	0.1 %RH
Adjustment points	35, 80 %RH
Response time τ <sub>63</sub>	<30 s, without filter
Long-term stability	<1.5 %RH / year
<b>Temperature measurement</b>	
Sensor	Thermistor
Measurement range	-20...60 °C
Accuracy at 23 °C ±5 K	±0.3 °K
Response time	4 s
<b>Conformities / Housing</b>	
CE / EMC compatibility	EMC-Directive 2014/30/EU, EN 61326-1:2012
Housing material	ABS
Dimensions	157 x 120 x 45 mm
Weight	Approx. 200 g
Software	ROTRONIC SW21 free of charge, HW4 subject to charge
<b>External temperature probe AC1215 (available as optional extra)</b>	
Sensor	Thermistor
Measurement range	-20...70 °C
Accuracy	±0.6 °C @ 5...40 °C, ±1.0 °C rest of range
Resolution	0.1 °C
Material of probe	Stainless steel
Material of handle	PVC
Probe dimensions	Ø 3.8 x 100 mm
Handle dimensions	Ø 12.3 x 74 mm
Cable length	116 cm
Connector	Jack plug Ø 2.5 x 11 mm

**Kuva 7.** Rotronic CL11- mittalaitteen tekniset tiedot (Rotronic, 2016).